

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЛУК'ЯНЕНКО ІВАН ВІТАЛІЙОВИЧ

УДК 621.74.046

ДИСЕРТАЦІЯ
ОСОБЛИВОСТІ ВИРОБНИЦТВА ДВОШАРОВИХ ВИЛИВКІВ ІЗ
МОДИФІКОВАНИХ У ЛИВАРНІЙ ФОРМІ ЧАВУНІВ

Спеціальність – 05.16.04 ливарне виробництво

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ /І. В. Лук'яненко/

Науковий керівник: Фесенко Максим Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент

Київ – 2020

АНОТАЦІЯ

Лук'яненко І.В. Особливості виробництва двошарових виливків із модифікованих у ливарній формі чавунів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.04 – ливарне виробництво. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2020 р.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної проблеми ливарного виробництва, а саме дослідженню особливостей технологічних процесів виготовлення двошарових чавунних виливків із застосуванням технології внутрішньоформового модифікування одного розплаву, замість традиційних трудомістких та енергозатратних способів виробництва такої номенклатури із застосування двох розплавів різного хімічного складу виплавлених в окремих плавильних агрегатах.

Основна частина роботи складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел та додатків.

У вступі: обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи; наведено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; сформульовано мету, завдання, об'єкт та предмет дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів; коротко описано методи дослідження та особистий внесок здобувача; представлено апробацію результатів дисертації.

Розділ 1 дисертації присвячено огляду конструкційних матеріалів із диференційованими властивостями, тенденція застосування яких в промисловості постійно зростає. Наведено їх основні властивості, переваги та недоліки, а також галузі застосування. Описано технологічні фактори (параметри), які впливають на формування таких матеріалів. Визначено, що ефективними процесами виготовлення матеріалів із диференційованими властивостями є методи лиття. Розглянуто існуючі технологічні варіанти

виготовлення шаруватих виробів методами лиття, які використовуються на підприємствах. Визначено, що розповсюдженим матеріалом для шаруватих виробів є чавун.

Описано базові принципи методів регулювання структурою та властивостями чавунних литих деталей, серед яких розповсюдженими є процеси модифікування. Встановлено доцільність використання технології внутрішньоформового модифікування чавуну для одержання литих двошарових виробів. Сформульовано мету дисертаційної роботи та поставлено задачі дослідження.

У розділі 2 описано матеріали, устаткування, технологію виготовлення ливарних форм та виплавляння чавуну, методи дослідження хімічного складу, структури, механічних та експлуатаційних властивостей двошарових чавунних виливків.

У розділі 3 досліджено технологічні параметри процесів модифікування базових розплавів під час виготовлення двошарових чавунних виливків. Встановлено вплив вмісту кремнію та вуглецю на процес кристалізації чавуну за метастабільною діаграмою з вибіленням та за стабільною діаграмою з виділенням графіту у виливках із товщиною перерізу стінки від 5 до 50 мм виготовлених у сухих піщано-глинястих формах. За результатами досліджень встановлено, що кристалізація чавуну за метастабільною діаграмою з вибіленням забезпечується за вмісту вуглецю від 2,8 до 3,0 % та кремнію від 0,45 до 0,50 %, за стабільною з виділенням графіту – від 3,4 до 3,6 % та від 2,2 до 2,4 % відповідно.

Проведено порівняльне дослідження впливу ковшового та внутрішньоформового оброблення графітизувальними та сфероїдизувальними модифікаторами на структуру чавунних виливків. Матеріалом для графітизувального модифікування обрано розповсюджений у промисловості сплав марки ФС75, для сфероїдизувального – феросилікомагнієвий сплав ФСМг7. Розмір фракції модифікаторів становив від 1 до 5 мм, а кількість – 2 % від маси рідкого чавуну.

Результатами досліджень підтверджено, що застосування внутрішньоформового модифікування, на відміну від ковшового, за перелічених умов, забезпечує стабільне отримання чавуну із заданими структурою та властивостями в усіх перерізах вилівка без вкраплин структурновільного цементиту навіть у перерізах стінок товщиною 5 мм. Це у свою чергу забезпечує усунення додаткової технологічної операції термічного оброблення, розповсюдженої у промисловій практиці для виготовлення чавунних виливків.

У розділі 4 досліджено особливості процесів виробництва двошарових чавунних виливків із застосуванням внутрішньоформового модифікування базового розплаву. Двошарові виливки одержувались за двома варіантами. Сутність першого варіанту полягає у послідовному заливанні ливарної форми окремими порціями через дві незалежні ливникові системи чавуном, схильним до кристалізації за метастабільною діаграмою, з витримуванням між етапами заливання. Перша порція чавуну через ливникову систему безпосередньо потрапляє у порожнину ливарної форми, а друга – проходить внутрішньоформове модифікування та доливає ливарну форму. Сутність другого полягає у заливанні рідкого чавуну через одну ливникову систему, в якій здійснюється внутрішньоформове модифікування, після чого чавун потрапляє у порожнину ливарної форми, в якій попередньо встановлено зовнішній холодильник.

У результаті попередніх експериментів за першим технологічним варіантом застосовано метод моделювання процесів заливання та кристалізації розплаву, який, після додаткового математичного оброблення, дозволив визначити ймовірні межі тимчасового інтервалу витримування між послідовними заливаннями ливарної форми.

Експериментальними дослідженнями підтверджено результати моделювання та встановлено параметри технологічного процесу, за яких забезпечується отримання у литому стані необхідної мікроструктури та механічних властивостей, а саме створення таких умов, за яких, після першого

етапу заливання, у робочому шарі виливка забезпечується кристалізація чавуну за метастабільною діаграмою з вибіленням, а в іншій частині виливка, після другого етапу заливання, – за стабільною діаграмою, з утворенням чавуну із включеннями графіту пластинчастої або кулястої форми, в залежності від типу використаного модифікатора. За допомогою металографічного аналізу досліджено перехідні зони, які утворилися у місцях з'єднання шарів чавунних виливків. Визначено їх розміри, морфологію графітних вкраплин та тип металевої матриці. Визначено кількісні характеристики структурних складових, як в перехідній зоні, так і в кожному шарі окремо, та механічні властивості шарів.

Встановлено, що для одержання дрібних чавунних двошарових виливків, які працюють в умовах абразивного та ударно-абразивного зношування, за технологією поетапного заливання рекомендовано наступні параметри технологічного процесу:

- температура заливання першої порції чавуну від 1300 до 1350 °С;
- температура доливання другої порції чавуну від 1440 до 1460 °С;
- час витримування між етапами заливання від 60 до 120 с.

За результатами моделювання за другим технологічним варіантом виробництва двошарових чавунних виливків отримано масив даних, який застосовано, після додаткового математичного оброблення, для визначення швидкостей охолодження в будь-якій точці виливка, що дозволяє, в залежності від їх значення, прогнозувати механізм його кристалізації.

На прикладі використання модифікованих базових чавунів, отриманих шляхом сфероїдизувального або графітизувального модифікування в реакційній камері ливарної форми, з відомими критичними швидкостями охолодження, перевищення яких веде до зміни механізму його кристалізації зі стабільної діаграми на метастабільну і, як наслідок, до вибілення, за результатами моделювання та наступного математичного оброблення встановлено апроксимаційні залежності та побудовано номограми, які

дозволяють прогнозувати глибину вибіленого шару чавунного виливка в залежності від заданих технологічних факторів процесу лиття.

Обґрунтовано, що використання отриманих даних моделювання та розрахунків може бути застосовано для прогнозування необхідної глибини робочого вибіленого шару чавунних деталей на етапі їхнього виготовлення, що, в свою чергу, збільшить економічний ефект від експлуатації виливків.

Наведено результати експериментальних досліджень технології одержання виливків, які поєднують у собі структуру чавуну з пластинчастим або кулястим графітом у матеріалі основи та білого чавуну в їх робочій частини. Описано отримані мікроструктури перехідної зони виливків та визначено механічні властивості робочого шару із білого чавуну та матричного шару із сірого чавуну.

Розроблено технологічні процеси виробництва двошарових чавунних виливків для роботи в умовах зношування, які пройшли успішні промислові випробування на підприємствах України. Розраховано економічні показники від впровадження двошарових виливків, виготовлених за дослідженою технологією у порівнянні із монолітними виливками із низьколегованого хромистого чавуну.

Ключові слова: абразивне зношування, білий чавун, високоміцний чавун, внутрішньоформове модифікування, двошаровий чавунний виливок, диференційовані властивості, зносостійкість, лиття в піщано-глинясті форми, перехідна зона, реакційна камера, сірий чавун, твердість.

ABSTRACT

Lukianenko I. V. Specifics of production of two-layer castings made of in-mold modified cast irons. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The thesis for Candidate of Engineering Sciences degree by speciality 05.16.04 – foundry. – National technical university of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2020.

The dissertation work is devoted to the solution of an actual problem of foundry production, namely, the study of the features of technological processes for manufacturing two-layer cast iron castings using the technology of in-mold modification of a single melt, instead of the traditional labor-intensive and energy-consuming methods of producing such a nomenclature from the use of two melts of different chemical composition in separate melting units.

The main part of the work consists of an introduction, four sections, general conclusions, a list of sources used and appendices.

In the introduction the urgency of the topic of the thesis; given the connection of work with scientific programs, plans, themes; formulates the aim, tasks, object and subject of research, scientific novelty and practical significance of the obtained results; briefly describes the research methods and the contribution of the applicant; presents testing results of the thesis.

Chapter 1 of the dissertation is devoted to the review of structural materials with differentiated properties, the trend of their application in industry is constantly growing. Their main properties, advantages and disadvantages, as well as applications are given. Technological factors (parameters) that influence the formation of such materials are described. It is determined that casting methods are effective processes for manufacturing materials with differentiated properties. The existing technological options for manufacturing layered products by casting methods, which are used in enterprises, are considered. It is determined that the common material for layered products is cast iron.

The basic principles of methods for regulating the structure and properties of cast iron parts are described, among which modification processes are common. The feasibility of using the technology of in-mold modification of cast iron to produce cast two-layer products is established. The purpose of the dissertation work is formulated and the research tasks are set.

Section 2 describes the materials, equipment, technology for manufacturing cast iron molds and smelting, methods for studying the chemical composition, structure, mechanical and operational properties of double-layer cast iron castings.

In section 3, the technological parameters of the processes of modifying base melts in the manufacture of double-layer cast iron castings are studied. The influence of the content of silicon and carbon on the process of crystallization of cast iron by a metastatic diagram with vibrations and a stable diagram with the release of graphite in castings with a wall cross-section thickness of 5 to 50 mm made in dry sand-clay forms was established. According to the results of research, it was found that the crystallization of cast iron by a metastatic diagram with vibratory levels is provided at a content of carbon from 2,8 to 3,0 % and silicon from 0,45 to 0,50 %, compared with the release of graphite – from 3,4 to 3,6 % and from 2,2 to 2,4 %, respectively.

A comparative study of the effect of ladle and in-mold processing of graphitizing and spheroidizing modifiers on the structure of cast iron castings. The material for graphitizing modification is a common industrial grade alloy FS75, for spheroidizing – ferrosilicomagnesium alloy FSMg7. The size of the modifier fraction was from 1 to 5 mm, and the quantity was 2 % of the mass of liquid cast iron.

The results of research confirmed that the use of in-mold modification, in contrast to ladle modification of these conditions, provides a stable production of cast iron with the specified structure and properties in all sections of the casting without interspersed structural cementite, even in sections of walls with a thickness of 5 mm. This, in turn, eliminates the additional technological operation of heat treatment, which is common in industrial practice for the manufacture of cast iron castings.

In Chapter 4, the features of the production processes of two-layer cast iron castings with the use of in-mold modification of the base melt are studied. Two-layer

castings were obtained in two ways. The essence of the first option is to consistently fill the mold in separate portions through two independent Gating systems with cast iron that is prone to crystallization according to the metastatic diagram, with holding between the stages of filling. The first portion of cast iron through the gating system directly enters the cavity of the mold, and the second-passes through the internal mold modification and refills the mold. The essence of the second consists in pouring liquid cast iron through a single gating system, in which the internal modification is carried out, after which the cast iron enters the cavity of the mold, in which an external chiller is pre-installed.

As a result of preliminary experiments on the first technological variants, a method for modeling the processes of pouring and crystallization of the melt was applied, which, after additional mathematical processing, allowed us to determine the probable boundaries of the time interval of exposure between successive castings of the mold.

Experimental tests confirmed the simulation results and parameters of the technological process, which is obtaining the as-cast microstructure and the required mechanical properties, namely the creation of conditions in which, after the first stage of the fill in the working layer of the casting is provided by the crystallization of iron metastable diagram with chilling, and in another part of the casting, after the second stage of casting, – behind a stable diagram, with the formation of cast iron with graphite inclusions of a lamellar or spherical shape, depending on the type of modifier used. Using metallographic analysis, the transition zones formed at the junction of layers of cast iron castings were studied. Their sizes, morphology of graphite inclusions and type of metal matrix are determined. The quantitative characteristics of the structural components, both in the transition zone and in each layer separately, and the mechanical properties of the layers are determined.

It is established that the following process parameters are recommended for obtaining small cast iron two-layer castings operating under conditions of abrasive and shock-abrasive wear using the technology of step-by-step casting:

- casting temperature of the first portion of cast iron from 1300 to 1350 °C;
- casting temperature of the second portion of cast iron from 1440 to 1460 °C;
- the holding time between filling stages is from 60 to 120 seconds.

The simulation results for the second process variant of the production of two-layer iron casting the resulting data set, which is applied, after further mathematical processing to determine the cooling rates at any point of the casting, that allows depending on their value, to predict the mechanism of its crystallization.

On the example of using modified base cast iron obtained by spheroidizing or graphitizing modification in the reaction chamber of the mold, with known critical cooling rates, exceeding which leads to a change in the mechanism of its crystallization from a stable diagram to a metastable and, as a result, to chilling, the results of modeling and subsequent mathematical processing established approximations and built nomograms, which allow you to predict the depth of the chilling layer of cast iron casting depending on the specified technological factors of the casting process.

It is proved that the use of the obtained modeling and calculation data can be applied to predict the required depth of the working bleached layer of cast iron parts at the stage of their manufacture, which, in turn, will increase the economic effect of the castings operation.

The results of experimental studies of the technology for producing castings that combine the structure of cast iron with lamellar or spherical graphite in the base material and white cast iron in their working part are presented. The obtained microstructures of the transition zone of castings are described and the mechanical properties of the working layer made of white cast iron and the matrix layer made of gray cast iron are determined.

Technological processes for the production of two-layer cast iron castings for working under wear conditions have been developed, which have passed successful industrial tests at Ukrainian enterprises. The economic indicators from the introduction of two-layer castings made according to the studied technology in comparison with monolithic castings made of low-alloyed chromium cast iron are calculated.

Keywords: abrasive wear, white cast iron, ductile cast iron, in-mold modification, two-layer cast iron, differentiated properties, wear resistance, sand-clay mold casting, transition zone, reaction chamber, gray cast iron, hardness.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Фесенко М. А. Графитизирующее модифицирование чугуна в литейной форме / М. А. Фесенко, В. А. Косячков, А. Н. Фесенко, **И. В. Лукьяненко**, Е. В. Фесенко // Металл и литье Украины. – 2015. – № 10 (269). – С.10-15.
2. Kosiachkov V. O. The Time Factor in the Spheroidizing and Graphitizing Modification and Cast Iron Crystallization / V. O. Kosiachkov, М. А. Fesenko, Е. V. Fesenko, **I. V. Lukianenko** // Materials Science. Non-equilibrium Phase Transformations. – 2016. – № 2. – С. 25-29.
3. Фесенко М. А. Влияние способа модифицирования на структуру и свойства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом в литом состоянии / М. А. Фесенко, Е. В. Фесенко, В. А. Косячков, **И. В. Лукьяненко** // Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. – 2016. – № 1 (37). – С. 96-101.
4. **Лукьяненко И. В.** Особенности технологического процесса изготовления двухслойных чугунных отливок с дифференцированными свойствами / **И. В. Лукьяненко** // Процеси лиття. – 2019. – № 2 (134). – С. 15-20.
5. **Лукьяненко И. В.** Исследование процессов дифференциации структуры чугунных отливок методом компьютерного моделирования / **И. В. Лукьяненко** // Металл и литье Украины. – 2019. – № 1-2. – С. 41-46.
6. **Лукьяненко И. В.** Исследование технологических параметров процесса получения чугунных отливок для работы в условиях износа / **И. В. Лукьяненко** // Металл и литье Украины. – 2019. – № 3-4. – С. 34-40.
7. Патент № 126086 U2017 11757, B22D27/00. Спосіб виготовлення багатопарових литих деталей / Фесенко М. А., **Лук'яненко І. В.**, Погребняк І. О. – Заявл. 01.12.2017; опубл. 11.06.2018, Бюл. № 11, 2018.
8. Косячков В. О., **Лук'яненко І. В.** Фактори часу в процесі сфероїдизувального та графітизувального модифікування і кристалізації

чавуну / Литье. Металлургия. 2014 : материалы X Международной научно-практической конференции (20-23 мая 2014 года). – Запорожье : ЗТПП, 2014. – С. 137-138.

9. Косячков В. О., Михалевич Д. О., **Лук'яненко І. В.** Вплив кремнію та модифікування магнієм на структуроутворення чавуну під час кристалізації / Нові матеріали і технології в машинобудуванні : матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції (20-21 травня 2014 року). – Київ : НТУУ „КПІ”, 2014. – С. 66-67.

10. Фесенко М. А., Косячков В. О., Фесенко А. М., Михалевич Д. О., **Лук'яненко І. В.** Метод виготовлення двошарових чавунних виливків / Нові матеріали і технології в машинобудуванні : матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції (21-22 травня 2015 року). – Київ : НТУУ „КПІ”, 2015. – С. 142.

11. Фесенко Е. В., **Лукьяненко И. В.**, Фесенко М. А., Ямшинский М. М. Способ изготовления чугуновых отливок с дифференцированной структурой и свойствами / Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах : матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції (6-9 жовтня 2015 року). – Запоріжжя : ЗНТУ, 2015. – С. 99-101.

12. Фесенко М. А., Фесенко А. М., Фесенко К. В., **Лук'яненко І. В.** Дослідження процесу отримання двошарових виливків методом фізичного моделювання / Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра : матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції (19 квітня 2016 року). – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – С. 955-962.

13. Фесенко М. А., Косячков В. А., Фесенко А. Н., Фесенко Е. В., **Лукьяненко И. В.** Способ получения износостойких двухслойных чугуновых литых деталей / Литье. Металлургия. 2016 : материалы XII Международной научно-практической конференции (24-26 мая 2016 года). – Запорожье : ЗТПП, 2016. – С. 221-222.

14. Фесенко М. А., Цыгановский К. В., Фесенко Е. В., **Лукьяненко И. В.** Новый способ изготовления двухслойных чугуновых отливок для работы в

умовлях ударно-абразивного износа / Нові матеріали і технології в машинобудуванні : матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції (30-31 травня 2016 року). – Київ : НТУУ „КПІ”, 2016. – С. 142-143.

15. Фесенко М. А., Фесенко А. М., Фесенко К. В., **Лук’яненко І. В.** Способи отримання литих шаруватих деталей / Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 6 : матеріали VI Міжнародної наукової конференції (01-02 грудня 2016 року). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. – С. 326-328.

16. Фесенко М. А., Фесенко Е. В., **Лукьяненко И. В.** Технология получения чугуновых отливок с твердой износостойкой поверхностью и вязкой ударостойкой частью из одного расплава / Уральская школа молодых металлургов : сборник материалов XVII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов – молодых ученых (5-9 декабря 2016 года). – Екатеринбург : Уральский федеральный университет, 2016. – С. 323-326.

17. Фесенко М. А., **Лук’яненко І. В.** Комп’ютерне моделювання способу виробництва двошарових литих деталей / Нові матеріали і технології в машинобудуванні : матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції (30-31 травня 2017 року). – Київ : НТУУ „КПІ”, 2017. – С. 186-187.

18. Фесенко М. А., **Лук’яненко І. В.** Розроблення технології отримання чавунних виливків з робочою зносостійкою та в’язкою монтажною частинами / Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві : матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції (25-28 вересня 2017 року). – Краматорськ : ДДМА, 2017. – С. 78-80.

19. Фесенко М. А., **Лук’яненко І. В.** Спосіб виготовлення чавунних деталей з диференційованою структурою та властивостями / Прикладні науково-технічні дослідження : матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції (03-05 квітня 2018 року). – Івано-Франківськ : Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаника, 2018. – С. 146.

20. Фесенко М. А., **Лук’яненко І. В.**, Кошіль А. В. Комп’ютерне моделювання процесу виготовлення двошарових чавунних виливків з одного

вихідного розплаву / Нові матеріали і технології в машинобудуванні : матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції (24-25 квітня 2018 року). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – С. 107-108.

21. Фесенко М. А., **Лук'яненко І. В.** Розроблення режимів лиття процесу виготовлення двошарових чавунних виливків із одного базового розплаву / Нові матеріали і технології в машинобудуванні : матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції (30-31 травня 2019 року). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – С. 109-110.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	17
ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1	
СТАН ПИТАННЯ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	24
1.1 Фактори, що впливають на утворення з'єднання між шарами.....	25
1.2 Теплофізичні та фізико-хімічні особливості отримання дифузійних перехідних зон.....	34
1.3 Технологічні варіанти виготовлення шаруватих виливків та їх особливості.....	37
1.4 Технологічні методи модифікування чавунів.....	50
Висновки та постановка задач дослідження.....	60
РОЗДІЛ 2	
МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	63
2.1 Шихтові матеріали і технологія виплавляння базових чавунів	63
2.2 Формувальні матеріали	64
2.3 Виготовлення і заливання форм	65
2.4 Зразки для досліджень	65
2.5 Дослідження структури та хімічного складу чавуну	66
2.6 Дослідження механічних властивостей	68
2.7 Моделювання процесів заливання та кристалізації	69
2.8 Визначення зносостійкості	70
2.9 Оброблення результатів експериментів	71
Висновки до розділу 2	73
РОЗДІЛ 3	
ВИЗНАЧЕННЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ БАЗОВИХ ЧАВУНІВ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ ПРОЦЕСУ МОДИФІКУВАННЯ	74

	16
3.1 Встановлення впливу вуглецю та кремнію на кристалізацію базових чавунів	74
3.2 Графітізувальне та сфероїдизувальне модифікування чавуну	79
Висновки до розділу 3	86
РОЗДІЛ 4	
ПРОЦЕСИ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ У ДВОШАРОВИХ ЧАВУННИХ ВИЛИВКАХ	88
4.1 Диференціація структури чавунного виливка за технологією виготовлення поетапним заливанням форми	88
4.1.1 Моделювання процесу поетапного заливання.....	91
4.1.2 Виробництво двошарового чавунного виливка з поєднанням шарів сірого та білого чавунів	93
4.1.3 Виробництво двошарового чавунного виливка з поєднанням шарів високоміцного та білого чавунів	97
4.2 Диференціація структури чавунного виливка за технологією виготовлення з використанням зовнішнього холодильника	102
4.2.1 Встановлення параметрів технологічного процесу моделюванням	103
4.2.2 Дослідження процесу формування виливка із градієнтною структурою	118
4.3 Дослідження зносостійкості робочого шару чавунних виливків	128
Висновки до розділу 4	131
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	133
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	136
ДОДАТОК А	149
ДОДАТОК Б.....	151

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

БР – базовий розплав;

СЧ – сірий чавун;

БЧ – білий чавун;

ВЧ – високоміцний чавун;

ГМ – графітизувальний модифікатор;

СМ – сфероїдизувальний модифікатор;

ФСМГ7 – феросилікомагнієвий модифікатор зі вмістом магнію 7%;

ФС75 – феросиліцієвий модифікатор зі вмістом кремнію 75%;

t – температура, °С;

НВW – твердість за Брінеллем;

НV – твердість за Віккерсом;

V – швидкість охолодження, °С/с;

НДР – науково-дослідна робота;

θ – крайовий кут змочування, °;

$t_{\text{зал}}$ – температура заливання форми, °С;

C_e – вуглецевий еквівалент, %;

τ – час кристалізації, с.

ВСТУП

Актуальність теми. У гірничому та металургійному виробництвах, нафтохімічній, цементній, гірничо-збагачувальній галузях, енергетичному й сільськогосподарському машинобудуванні та інших галузях промисловості країни використовують механізми, машини та устаткування для видобування, транспортування, подрібнення та оброблення різних матеріалів, які працюють в умовах інтенсивного зношування, тобто експлуатуються в екстремальних умовах.

У таких умовах роботи машин і механізмів багато деталей, які входять до складу цього устаткування, потребують сучасних технологій їх виготовлення, які б забезпечували оптимальне поєднання технологічних, фізико-механічних та експлуатаційних властивостей.

Одним із напрямків вирішення цієї проблеми є використання технологій виготовлення литих деталей двошаровими з різною структурою та властивостями окремих їх частин. Відомо, що високу твердість металу й зносостійкість деталей можна забезпечити білим чавуном, що вміщує структурно вільні карбіди заліза, а підвищену в'язкість – сірим чавуном із пластинчастим графітом або високоміцним чавуном феритно-перлітного класу з кулястою формою графіту.

Виробництво литих деталей з різною структурою та властивостями окремих їх частин можна здійснювати різними способами лиття. Це можуть бути технології послідовного або одночасного заливання розплавів у ливарну форму з використанням розділової перегородки, яку встановлюють у порожнину форми, послідовного заливання у форму розплавів через незалежні ливникові системи з витримуванням між заливаннями, відцентрового способу з послідовним заливанням розплавів у виливницю, заливання розплаву на тверду заготовку та безперервного лиття в кристалізатори. Проте більшість цих технологій потребує одночасного виплавлення розплавів різного хімічного складу в окремих плавильних агрегатах і використання операцій додаткового

оброблення розплавів з наступним їх заливанням в ливарну форму за необхідною послідовністю, що ускладнює та здорожує технологічний процес виготовлення таких виливків і погіршує умови роботи.

Зменшити або усунути ряд недоліків технологічних процесів виготовлення двошарових виливків можна використанням методів пізнього модифікування, серед яких перспективним є метод внутрішньоформового модифікування. Сутність методу полягає в тому, що розплав чавуну взаємодіє з подрібненим модифікатором у реакційній камері ливникової системи під час заливання ливарної форми. Проте одним із недоліків внутрішньоформового модифікування є ймовірність нерівномірного засвоєння добавок модифікатора потоком чавуну, що призводить до формування виливків з неоднорідною структурою. Усунення цього недоліку забезпечує можливість виготовлення з одного вихідного розплаву двошарових виливків з різною структурою та властивостями.

Відомості щодо особливостей використання методу внутрішньоформового модифікування для виготовлення двошарових виливків із чавунів різного класу вкрай обмежені, що потребує виконання розширених досліджень у напрямку встановлення особливостей цього процесу. Виконані дослідження дадуть змогу чітко встановити як теоретичні аспекти, так і технологічні параметри процесів виготовлення двошарових виливків з використанням внутрішньоформового модифікування чавунів. Це сприятиме суттєвому спрощенню існуючих технологій виробництва такого литва та зменшити безповоротні втрати дорогих компонентів, що вміщуються в легованих сплавах, з яких виготовляють зносостійкі литі деталі для роботи в екстремальних умовах. Отже, робота є актуальною як для вирішення наукових проблем модифікування сплавів на основі заліза, так і такою, що потребує розроблення та впровадження у виробництво досконалих технологій виготовлення двошарових литих деталей для роботи в екстремальних умовах.

Актуальність роботи лежить і в економічній площині, оскільки заміна дорогих ливарних високолегованих сплавів, особливо за відсутністю в

теперішній час в Україні феросплавів, дешевими, сприятиме суттєвому зниженню собівартості продукції ливарних цехів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась на кафедрі ливарного виробництва чорних та кольорових металів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» і мала зв'язок з темою «Технологічні особливості прогнозування властивостей розплавів і структури металу виливків для роботи в екстремальних умовах». Номер державної реєстрації 0115U000406.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розроблення технологічних процесів виробництва двошарових чавунних виливків з одного базового чавуну модифікованого в ливниковій системі ливарної форми.

Для досягнення мети в роботі сформульовано такі задачі дослідження:

1. Теоретично обґрунтувати та вибрати хімічні склади базових чавунів, схильних до кристалізації за метастабільною та стабільною діаграмами для забезпечення заданих структури металу та його властивостей у виливках.

2. Обґрунтувати та вибрати ефективні графітизувальний і сфероїдизувальний модифікатори.

3. Виконати моделювання та дослідження технологічних варіантів виготовлення двошарових виливків для перевіряння можливості їхньої реалізації у виробничих умовах і встановлення практичної доцільності використання кожного з них.

4. Дослідити процеси кристалізації модифікованих чавунів у порожнині ливарної форми й установити закономірності структуроутворення та формування властивостей металу в двошарових виливках.

Розробити та впровадити у виробництво технологічні процеси виготовлення двошарових чавунних виливків з використанням внутрішньоформового модифікування базового розплаву, який виплавлено в одному плавильному агрегаті.

Об'єкт дослідження: процес виробництва двошарових чавунних виливків модифікуванням базового розплаву в ливарній формі.

Предмет дослідження: хімічний склад, технологічні параметри процесів модифікування, структури металів і перехідної зони в двошарових виливках, механічні та експлуатаційні властивості виготовлених виливків.

Методи дослідження. У роботі використано сучасні методи та устаткування для проведення термічного, хімічного та металографічного аналізів, а також для визначення механічних та експлуатаційних властивостей чавуну у виливках.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Досліджено процес формування мікроструктури у перехідних зонах двошарових чавунних виливків, виготовлених способом послідовного заливання форми через незалежні ливникові системи. Установлено, що мікроструктура перехідної зони може змінюватися від половинчастого чавуну з вкрапленнями пластинчастого графіту та цементиту в перлітній металевій матриці для виливка з поєднанням шарів білого та сірого чавунів до чавуну з вкрапленнями кулястого та вермикулярного графіту й цементиту в перлітній металевій матриці – для виливка з поєднанням шарів білого та високоміцного чавунів.

2. Встановлено залежності впливу температури заливання розплаву та часу витримування між заливаннями на розміри перехідних зон у двошарових чавунних виливках товщиною до 50 мм. Показано, що зниження температури заливання розплаву від 1460 °С до 1380 °С та збільшення часу витримування між заливаннями від 3 с до 480 с призводять до зменшення товщини перехідного шару у виливках від 1,0 до 0,01 мм.

3. Досліджено процес формування мікроструктури виливках з чавуну, які виготовлено способом заливання на зовнішній холодильник. При цьому встановлено вплив товщини стінок зовнішнього холодильника та виливка на глибину вибіленого шару в двошарових чавунних виливках, а також визначено,

що за збільшення їх товщини від 10 мм до 50 мм глибина вибілення змінюється в межах від 1,5 мм до 14,9 мм.

4. Встановлено, що зносостійкість робочої зони двошарового виливка, що виготовлено за технологією поетапного заливання ливарної форми знаходиться на рівні еталонного зразка, який виготовлено із низьколегованого хромистого чавуну. Наряду з цим показано, що використання зовнішнього чавунного холодильника підвищує дану характеристику на 10-20 % у порівнянні з еталоном й знаходиться в прямо пропорційній залежності від його товщини та обернено пропорційній – від розміру стінки виливка.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновано технологічні варіанти виготовлення двошарових чавунних виливків для роботи в екстремальних умовах; визначено хімічні склади чавунів, які доцільно застосовувати для виробництва двошарових виливків за різними технологічними варіантами та хімічний і гранулометричний склади модифікаторів для внутрішньоформового графітізувального й сфероїдизувального модифікування чавунів, схильних до кристалізації за метастабільною та стабільною діаграмами; розроблено технологічні процеси виробництва двошарових чавунних виливків («Прес-форма військової каски», «Плита броньова», «Корпус вібратора»), впроваджено їх у виробництво, що дало змогу знизити собівартість такого литва в 1,4-1,5 рази в порівнянні із собівартістю виробництва монолітних виливків такого ж призначення із низьколегованого хромистого чавуну.

Особистий внесок здобувача. Дисертація виконана автором самостійно й базується на результатах досліджень, що опубліковані. Основні експериментальні дані й наукові положення дисертаційної роботи одержані й сформульовані автором у співавторстві.

У роботах, які опубліковано в співавторстві, здобувачеві належить наступне: постановка завдань, організація, планування та проведення досліджень з оформленням матеріалів до друку [3-6, 9, 16, 19, 20]; проведення дослідних плавок [4-6, 9, 13]; моделювання й дослідження процесів

модифікування чавунів різного класу [5, 11, 16, 19]; визначення варіантів виготовлення двошарових виливків у лабораторних та виробничих умовах [4-6, 9, 10, 12-15, 17, 18]; аналіз та опрацювання результатів досліджень [1-3, 7, 8, 16, 19, 20]; узагальнення та обговорення результатів досліджень [1-3, 7, 8]; проведення металографічних досліджень [4-6]; проведення патентного пошуку [21]; відпрацювання технологій у лабораторних і промислових умовах [4-6, 17, 18, 20, 21].

Основні положення, висновки та рекомендації виконано спільно з науковим керівником і співавторами публікацій. Автор узагальнив результати досліджень і виконав апробацію запропонованих технічних рішень.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові положення та результати роботи представлено та обговорено на міжнародних конференціях: «Литьє. Металлургия 2014, Литьє. Металлургия 2016» (м. Запоріжжя, 2014, 2016 рр.), «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» (м. Київ, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019 рр.), «Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах» (м. Запоріжжя, 2015 р.), «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра» (м. Київ, 2016), «Матеріали для роботи в екстремальних умовах» (м. Київ, 2016), «Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві» (м. Краматорськ, 2017), «Прикладні науково-технічні дослідження» (м. Івано-Франківськ, 2018).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи викладено в 21 науковій праці, з яких 6 статей у наукових фахових виданнях, з них 1 стаття в закордонному виданні, 1 патент України на корисну модель, 14 тез доповідей в збірниках матеріалів наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації складає 154 сторінки, у тому числі 62 рисунки, таблиць, список використаних джерел з 119 найменувань.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

Проблеми підвищення експлуатаційного ресурсу деталей машин і механізмів, робота яких проходить в умовах інтенсивного зношування, зменшення безповоротних втрат дорогих металів та високолегованих сплавів на сьогоднішній день є одними з найбільш актуальних в промисловості України та світу [1, 2]. Обсяг споживання металевих зносостійких матеріалів становить близько трьох млн. т. на рік та зростає з кожним роком [3-6] при світовому виробництві виливків загальною масою 109,9 млн. т. за даними [7] у 2017 році.

Найбільш перспективним напрямком у вирішенні даних проблем є використання біметалевих або шаруватих матеріалів, які поєднують у собі комплекс властивостей, диференційований по їхньому перерізу. Слід зауважити, що біметалевим називають матеріал, який складається з двох і більше частин із сплавів різного хімічного складу, які з'єднані між собою металевим зв'язком. Визначення «шаруватий матеріал» близьке за значенням до біметалевого, однак вживається у випадку, якщо матеріал складається із шарів, які можуть бути виготовлені як з різних матеріалів, так і з одного. Об'єднання різних металів або сплавів за допомогою технологій ливарного виробництва у шаруваті виливки дозволяє не лише поєднати властивості окремих складових, а й отримати абсолютно нові, які неможливо отримати у монометалевих виробках. За своїм функціональним призначенням такі виливки поєднують високу твердість та зносостійкість робочої частини із конструкційною міцністю, ударною в'язкістю та задовільними характеристиками пластичності металу основи [1, 8-12].

Поєднання оптимальних експлуатаційних, технологічних та фізико-механічних властивостей дозволяє використовувати зносостійкі шаруваті виливки у гірничому та металургійному виробництві, нафтохімічній, цементній, гірничо-збагачувальній та харчовій промисловості [13], енергетичному машинобудуванні [14], сільському господарстві та інших

галузях промисловості країни. Застосування шаруватих виливків в робочих органах машин і механізмів, які працюють в умовах інтенсивного абразивного зношування, в тому числі ударно- та гідро-абразивного, дозволяє збільшити ресурс їхньої роботи у 2,5-6,0 разів, скоротити використання дорогих високолегованих сплавів і легувальних елементів на 70%, у деяких випадках відмовитися від використання методів наплавлення і відновлення деталей стрічкою, дротом або електродами, зменшити обсяги виробництва запасних частин, підвищити конкурентоспроможність обладнання на вітчизняному та світовому ринках [1, 8]. При цьому, за даними [10, 15], як якісно нові у світовій практиці, шаруваті матеріали відомі з кінця XIX століття.

1.1 Фактори, що впливають на утворення з'єднання між шарами

Однією з основних вимог, яку висувають до шаруватих виробів, – міцний зв'язок між шарами по всій поверхні з'єднання. Механічні характеристики зони з'єднання різнорідних шарів визначаються міцністю металевих зв'язків, властивостями розчинів і фаз, які утворюються безпосередньо у цій зоні відповідно до діаграм стану [10, 11].

Відомо [16], що необхідною умовою з'єднання є зближення атомів металів, що сполучаються на відстань дії міжатомних сил, що досягається у разі змочування одним рідким металом іншого.

Змочування поліпшується із зменшенням різниці температур плавлення металів. За міру змочування приймають косинус крайового кута, величину якого визначають співвідношенням між адгезією рідини до твердого тіла і когезією самої рідини, ця величина виражається через поверхневі натяги на межах розділення твердого тіла, рідини та газу та визначається за формулою 1.1 [10, 11].

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{\text{т-г}} - \sigma_{\text{т-р}}}{\sigma_{\text{р-г}}}, \quad (1.1)$$

де θ – крайовий кут змочування, рад.;

$\sigma_{\text{т-г}}$ – поверхневий натяг на межі розділення тверде тіло – газ, Н/м;

$\sigma_{\text{т-р}}$ – поверхневий натяг на межі розділення тверде тіло – рідина, Н/м;

$\sigma_{\text{р-г}}$ – поверхневий натяг на межі розділення рідина – газ, Н/м.

Енергія адгезії визначається рівнянням Дюпре [17]:

$$W_{\text{т-р}} = \sigma_{\text{р-г}}(1 + \cos\theta), \quad (1.2)$$

де $W_{\text{т-р}}$ – енергія адгезії між твердим тілом та рідиною, Н/м.

Змочування багато в чому визначається співвідношенням температур плавлення твердого та рідкого металів. Мала відмінність у температурах плавлення сплавів, зазвичай, призводить до розчинення поверхневих шарів твердого металу та додаткового очищення поверхні у випадку заливання розплаву на попередньо підготовлену тверду заготовку [18]. Фізико-хімічні процеси в зоні з'єднання протікають активніше, коли температура поверхні твердого металу вище температури плавлення рідкого металу. Якщо ця умова не виконується, то рідкий метал буде кристалізуватися на поверхні твердого, що ускладнить процес змочування [11].

Для зменшення похибки при вимірюванні крайових кутів змочування та встановлення умов, які забезпечують хороший контакт між шарами, за даними [18], користуються поняттям «розтікання», яке пропорційно залежить від змочування, а повне розтікання розплаву поверхнею металу можливе при нульовому значенні крайового кута змочування.

Взаємне змочування різних сплавів і розтікання розплаву по поверхні твердих металів вивчалось багатьма дослідниками [19-21], які дійшли висновку,

що для управління процесами змочування та розтікання, необхідно, перш за все, знати величини поверхневих натягів на межах фаз, які взаємодіють між собою, та їхню залежність від різних фізико-хімічних факторів. Значною мірою розтікання розплаву залежить від шорсткості поверхні твердого металу [20].

Крім вище зазначених факторів, на отримання шаруватих виробів значною мірою впливає якість з'єднання, а саме структура перехідної зони між шарами різнорідних матеріалів, від якої залежать механічні, а в певних умовах і експлуатаційні властивості виробів.

Механізми з'єднання металевих поверхонь пояснюються по-різному, втім, основним фактором, який впливає на якість з'єднання двох матеріалів та утворення перехідної зони між ними є наявність оксидних плівок на поверхнях матеріалу, утворення яких є неминучим процесом у рідкій, твердій фазі, та під час твердіння шару матеріалу.

В результаті термодинамічних досліджень можливих реакцій окиснення на міжфазній межі «метал – повітря» встановлено, що на поверхнях вуглецевих, низьколегованих сталей, а також нелегованих та легованих чавунів, які можуть застосовуватися як матеріал основи під час виробництва шаруватих виробів, в наслідок взаємодії з повітрям утворюються оксиди заліза, марганцю, кремнію, міді, хрому тощо [22].

При цьому, враховуючи роботи [10, 18], слід пам'ятати, що поверхневий натяг оксидів значно нижче, ніж металів, тому поверхневий натяг твердого металу, покритого окисною плівкою, значно нижче, ніж чистого металу. Отже, видалення окисних плівок із поверхні твердого металу буде покращувати розтікання розплаву. Однак, механічного очищення металевої поверхні недостатньо для видалення оксидної плівки та забезпечення змочування, так як при одночасному її видаленні з поверхні матеріалу відбувається повторне утворення при контакті з киснем повітря з тою чи іншою швидкістю, залежно від матеріалу (табл. 1.1). Крім плівки оксидів, на поверхні матеріалів обов'язково присутні абсорбовані шари газових молекул, сліди жиркових забруднень тощо (рис. 1.1), видалення яких з контактних поверхонь є

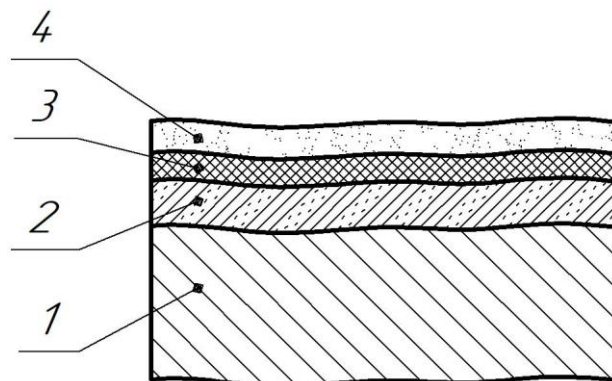
обов'язковою операцією в технологічному процесі виробництва будь-яких шаруватих виробів.

Встановлено [11], що склад оксидної плівки та її товщина залежать від природи металу, складу навколишнього середовища та умов їхньої взаємодії, а саме: температури, тиску та тривалості. Оксидні плівки на металах утворюються в результаті фізичної адсорбції – захоплення поверхневими атомами металу молекул навколишнього газу, в першу чергу кисню, і подальшої хімічної адсорбції – взаємодії атомів газу і металу, в результаті чого виникають міцні зв'язки.

Таблиця 1.1

Швидкість утворення оксидної плівки на металах в атмосфері повітря за нормальних умов [18]

Метал / сплав	Товщина оксидної плівки в нм, яка утворюється за		
	1 хв.	1 год.	24 год.
Хромиста сталь	1,0	1,0	1,0
Залізо	2,0	2,4	3,3
Алюміній	2,0	8,0	10,0
Мідь	3,3	5,0	15,0



1 – глибинний шар; 2 – зовнішній шар з частинками оксидів; 3 – оксидний шар; 4 – адсорбований шар

Рис. 1.1. Поверхня металу на повітрі [11]

Результати досліджень впливу оксидних плівок на здатність металів до з'єднання привели до створення плівкової гіпотези [10, 11], суть якої зводиться до того, що утворення з'єднання двох металів досить зблизити їх контактні поверхні на відстань дії міжатомних сил (при цьому контактні поверхні не повинні мати забруднень і оксидних плівок). У реальних умовах на поверхні металів, що сполучаються, завжди є оксидна плівка, що перешкоджає з'єднанню. Таким чином, з'єднання двох металів можливо лише в тому випадку, якщо в процесі оксидні плівки руйнуються та одночасно відкриваються ювенільні поверхні. У окремих випадках для полегшення появи ювенільних ділянок на контактні поверхні наносять штучні крихкі плівки, наприклад тонкі гальванічні покриття [11].

Дослідниками [1] встановлено, що утворені на поверхні матеріалу оксидні плівки істотно впливають на міжфазні процеси, гальмують розтікання рідкого металу поверхнею твердого, перешкоджають дифузійній взаємодії металів і, як наслідок, значно ускладнюють формування надійної перехідної зони між сплавами різних шарів, що обумовлює необхідність їх видалення з межі контакту при одночасному запобіганні подальшого окислення.

Необхідною умовою утворення дифузійного зв'язку між шарами є зближення їх атомів на відстані, близькій до дії міжатомних сил, що досягається у разі змочування рідким металом твердого [20].

Виконання функції очищення поверхневих шарів матеріалу від оксидних плівок та різного роду забруднень численні дослідники [1, 18, 23-29] вирішують за допомогою застосування різного роду флюсів, механізм впливу яких на процеси змочування і розтікання полягає в зміні у широких межах поверхневого натягу на межах розділення фаз рідина – флюс і тверде тіло – рідина, що забезпечує змочування навіть у системі взаємно нерозчинних металів. Звідси можна зробити висновок, що змочування кожної конкретної пари металів можна покращати, використавши в якості середовища, що бере участь у процесі змочування, не атмосферне повітря, а, наприклад, розплав солей. У виробничій практиці добре відомо, що без застосування флюсів

неможливо здійснити пайку [30, 31] і зварювання [32, 33]. Як флюси, найчастіше беруть суміші галогенних солей різних металів [24-26, 28]. Поверхневий натяг сольових розплавів невеликий, тому вони добре змочують поверхню твердих металів (табл. 1.2).

Таблиця 1.2

Поверхневий натяг розплавів солей [18]

Хімічна формула	Температура розплаву солі, °C	Поверхневий натяг, мН/м
BiCl_3	271	66,2
BiBr_2	250	66,5
CdCl_2	602	77,2
KI	681	78
NaI	660	88
CsI	620	91
KCl	780	97
SnCl_2	307	97
CsF	692	107
NaCl	801	114
K_3BO_3	946	137
LiCl	603	140
KH_2PO_4	820	161
NaPO_3	620	209
LiF	840	255
Li_3BO_3	845	265

Таким чином, якщо розтікання краплі металевого розплаву по поверхні твердого металу відбувається не в газовому середовищі, а в розплавлених солях (флюсах), то можливе порушення рівноваги, і в тому випадку, коли зменшення величини поверхневого натягу розплаву за своїм значенням перевищить

зменшення поверхневого натягу твердого металу, коефіцієнт розтікання збільшиться і розтікання покращиться, чого можна досягти відповідним підбором солей [18].

На думку [18] найбільш повно механізм впливу флюсу на процес змочування і розтікання розплаву поверхнею твердого матеріалу пояснюється з позиції його впливу на співвідношення величин поверхневих натягів. Згідно з другим законом термодинаміки повне мимовільне розтікання розплаву поверхнею твердого матеріалу можливе лише у випадку зменшення вільної енергії системи. Дану умову виражають наступним чином:

$$\sigma_{\text{т-ф}} > \sigma_{\text{р-ф}} + \sigma_{\text{т-р}}, \quad (1.3)$$

де $\sigma_{\text{т-ф}}$ – поверхневий натяг на межі розділення тверде тіло – флюс, Н/м;

$\sigma_{\text{р-ф}}$ – поверхневий натяг на межі розділення рідина – флюс, Н/м;

$\sigma_{\text{т-р}}$ – поверхневий натяг на межі розділення тверде тіло – рідина, Н/м.

Для підбору складу суміші солей флюсу, враховуючи наведену вище умову, можна зробити висновок, що флюс покращує розтікання розплаву поверхнею лише в тому випадку, якщо він зменшує поверхневий натяг розплаву і збільшує (або знижує на меншу величину) поверхневий натяг твердого матеріалу. При цьому слід пам'ятати, що поверхневий натяг оксидів значно нижче, ніж чистих металів, тому поверхневий натяг твердого металу, покритого оксидною плівкою, значно нижче, ніж чистого [18]. Отже, видалення окисних плівок з поверхні твердого металу буде покращувати розтікання по ньому розплаву.

Використання технології отримання біметалу із залізовуглецевих сплавів шляхом заливання розплаву на твердий матеріал основи висуває певні вимоги до флюсу, яким його покривають [26]. Перш за все покриття повинне захищати поверхню заготовок від знеуглецювання і окислення, сприяти процесам, що протікають на межі розділення твердий метал – розплав, зменшувати кут

змочування та сприяти розтіканню розплаву. Покриття, нанесене на поверхню складної конфігурації (вертикальні або стельові ділянки), має бути стійким в широкому інтервалі температур. Поверхня металу основи повинна бути очищена від забруднень і зберігати такий стан в робочому діапазоні температур для забезпечення надійного змочування її рідким металом. Це можливо в тому випадку, якщо поверхня металу-основи буде покрита тонкою, щільною, кисненепроникною плівкою.

Дослідження щодо створення флюсів для отримання біметалевих виливків із залізовуглецевих сплавів проводилися вітчизняними дослідниками [1, 22, 26, 34], результатом яких стало розроблення синтетичного флюсу на основі солей борної кислоти та борного ангідриду наступного складу: 60-80 % $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, 10-30 B_2O_3 , 4-6 % K_2ZrF_6 , 4-6 % SiO_2 . Роль фторцирконату калію полягає у інтенсивному зниженні поверхневого натягу бури в робочому діапазоні температур, а додавання SiO_2 дозволяє покращити властивості системи $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-B}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{ZrF}_6$ та підвищити робочі температури захисної плівки до 1100-1150 °C. При цьому вміст Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , Al_2O_3 у вихідному флюсі не повинен перевищувати 0,5%. Встановлено, що внаслідок протікання реакцій взаємодії оксидів на поверхні матеріалу основи з компонентами флюсу утворюються твердофазні комплекси $\text{MnO} \times \text{SiO}_2$, $2\text{FeO} \times \text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O} \times \text{SiO}_2$, $\text{K}_2\text{O} \times \text{SiO}_2$, $\text{ZrO}_2 \times \text{SiO}_2$, $\text{FeO} \times \text{Cr}_2\text{O}_3$, $2\text{NiO} \times \text{SiO}_2$, Na_2SiO_3 , $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$, NaFeO_2 , K_2SiO_3 , $\text{K}_2\text{Si}_2\text{O}_5$, які, у відповідності до технологічного процесу, видаляються з поверхні твердого (затверділого) металу потоком розплаву другого шару, який доливають у ливарну форму [22]. У роботі [23] автори рекомендують остаточне оброблення твердих заготовок проводити 5 %-вим розчином бури або флюсом системи $\text{Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. Ефективність використання солей борної кислоти підтверджена також і закордонними дослідниками [28, 29].

Також позитивні результати використання флюсів досягнуто на прикладі виробництва біметалевих циліндричних втулок бурового насосу за допомогою відцентрового способу лиття, оскільки, за даними [25] класична технологія відцентрового лиття не забезпечує отримання якісних багат шарових виливків,

а внутрішня поверхня залитого першого шару виливка покривається плівкою оксидів внаслідок контакту розплаву з атмосферним повітрям. В якості флюсу використали суміш порошків CaO , Al_2O_3 та CaF_2 , яку вводили безпосередньо у виливницю після заливання першого шару сталі 20ХГСФЛ [24].

За результатами досліджень [23-25] встановлено, що використання синтетичного флюсу при відцентровому способі виробництва виливків із чорних і кольорових сплавів забезпечує надійний захист його внутрішньої поверхні від окислення, гарантує якісне зварювання металів при поєднанні різноманітних металевих пар, суттєве підвищення якості виливів, дозволяє в 3-4 рази зменшити припуски на механічне оброблення, зменшити відсоток браку за тріщинами, зазорами, плівками, а також покращити мікро- і макроструктуру. За рекомендаціями [23] синтетичні флюси вибираються з урахуванням температурного інтервалу зварювання металів, їх хімічного складу у вигляді порошкоподібних сумішей або розплавів, а для виробництва біметалів на основі залізовуглецевих сплавів робочі температури флюсів повинні знаходитися в інтервалі 800-1300 °С. Для отримання біметалевих виливків із металів зі значною різницею температур плавлення характерною особливістю є попереднє підготовлення твердого матеріалу основи, яке полягає у механічному, хімічному або електрохімічному обробленні з наступним нанесенням на нього шару у вигляді тонкої плівки легкоплавкого металу або сплаву. При цьому досягається гарне змочування матеріалу основи сплавами на основі олова, свинцю або цинку. Такі процеси набули поширення при виробництві біметалевих втулок, вкладишів підшипників тощо. Наприклад, нанесення шару цинку товщиною 0,16 мм при температурі 500-600 °С в якості захисного покриття на сталеву направляючу верстатної деталі після заливання її чавуном дозволяє отримати з'єднання близьке за міцністю до матеріалу основи [23].

1.2 Теплофізичні та фізико-хімічні особливості отримання дифузійних перехідних зон

При виготовленні біметалів методами лиття [1, 3-11, 35], наплавлення [36, 37] та паяння [30, 31] з'єднання шарів відбувається в результаті взаємодії твердого металу з рідким або двох рідких металів. Здатність металів до з'єднання визначається їх взаємною розчинністю, а також утворенням крихких хімічних сполук – інтерметалідів. Метали, що взаємно не розчиняються в рідкому стані, наприклад, залізо – свинець, залізо – магній, свинець – мідь, алюміній – свинець, під час розплавлення утворюють шари, які не змішуються та легко розділяються після тверднення. Найлегше утворюється та характеризується найбільшою міцністю з'єднання металів, які необмежено взаємно розчиняються не лише в рідкому, але і твердому станах, тобто утворюють безперервний ряд твердих розчинів, наприклад, мідь – нікель, магній – кадмій тощо). Проміжні між двома цими крайніми положеннями займають композиції металів, що мають обмежену розчинність у твердому стані (залізо – мідь тощо), нерозчинні в твердому, але розчинні у рідкому стані (алюміній – олово, цинк – олово тощо), а також метали, що утворюють інтерметалідні фази (залізо – алюміній, залізо – цинк тощо). Взаємна розчинність металів визначається схожістю їх кристалічних решіток, співвідношенням атомних радіусів, величиною електронегативності, що характеризує енергію зв'язку між двома елементами, та іншими факторами, що визначають хімічну спорідненість металів. Необхідно враховувати, що розчинність металів, а також утворення інтерметалідів залежать від температури, тому правильний вибір режиму процесу створення металевої композиції у багатьох випадках дозволяє зменшити негативний вплив обмеженої розчинності, звести до мінімуму або повністю виключити утворення крихких з'єднань, що в результаті призводить до створення досить міцного з'єднання [11].

Дослідженням процесів розчинення металів і сплавів на основі заліза та модифікаторів у металевих розплавах присвячено багато робіт [17, 38-41]. Відомо, що чим більше дана система відхиляється від ідеальної, тим більше ускладнюється механізм розчинення, а розрахункові значення кінетичних параметрів розчинення не узгоджуються з експериментальними. Зазвичай шихтові матеріали мають високу пористість та неоднорідність макроструктури, тому в розплаві вони поділяються на елементи макроструктури, тобто зерна, кристаліти, які згодом розчиняються у розплаві, що обумовлює термодинамічну нерівноважність металевих розплавів. Для встановлення стану рівноваги необхідна тривала витримка розплаву за високої температури. У зв'язку з цим, властивості виливків істотно залежать від режимів плавлення: температури та часу витримання, інтенсивності перемішування розплаву, послідовності завантаження шихтових матеріалів. Значний вплив на нерівноважність розплаву здійснюють хімічні реакції між компонентами розплаву, розплавом і футеруванням печі, розплавом і киснем атмосферного повітря.

За даними роботи [17] процес розчинення заліза і сталі в рідких розплавах можна розділити на три стадії: наморозування розплаву на холодну тверду частинку, розплавлення наморозеного шару після його прогрівання до температури розплаву та ізотермічне розчинення. Перші дві стадії відносяться до процесів кристалізації та плавлення, а їхня динаміка визначається процесом теплообміну між твердими матеріалами та рідким чавуном. Кінетика останньої стадії залежить від умов масообміну між рідким і твердим станами в системі. Залежно від температури розплаву та плавлення матеріалу твердої частинки, її взаємодія з розплавом може проходити або шляхом плавлення, якщо температура розплаву вища за температуру ліквідус твердої частинки, або шляхом розчинення, у протилежному випадку. У першому випадку швидкість плавлення твердих частинок визначається теплофізичними характеристиками твердого тіла, а саме його температуропровідністю, і буде дорівнювати швидкості поширення тепла в об'ємі твердого тіла. У другому випадку швидкість розчинення буде визначатися швидкістю дифузії компонентів з

твердого тіла у рідину. У процесі розчинення заліза в залізовуглецевому розплаві установлюються два потоки, які направлені на зустріч один одному. Для заліза спостерігається потік його атомів з твердого тіла у розплав за рахунок різниці концентрації заліза у зразку та розплаві, а також рух вуглецю з розплаву до твердого тіла внаслідок наявної різниці концентрацій у розплаві та дифузійному шарі на межі розділення фаз [17]:

$$j_C = \beta_C ([C] - [C]_s); \quad (1.4)$$

$$j_{Fe} = \beta_{Fe} ([Fe]_s - [Fe]). \quad (1.5)$$

де j_C, j_{Fe} – потік речовини, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

β_C, β_{Fe} – коефіцієнт пропорційності;

$[C], [C]_s, [Fe]_s, [Fe]$ – концентрації елементів, %.

Отже, суттєвий вплив на формування біметалевого виливка здійснюють теплофізичні та фізико-хімічні умови отримання перехідних зон. При цьому розмір перехідних зон створених біметалів залежить від швидкості розчинення, дифузійного масопереносу на межі поділу фаз [17, 22, 42] та технологічних параметрів заливання [43]. Для встановлення даних параметрів необхідне детальне вивчення процесу утворення фізичного контакту та масопереносу, яке пов'язано з обґрунтуванням закономірностей перерозподілу легувальних елементів у зоні взаємодії розплаву з твердим матеріалом основи.

Враховуючи дані роботи [18], отримання біметалевого з'єднання двох сплавів, які виготовлені на основі одного компонента, наприклад, на основі заліза, з технологічної точки зору є найбільш простим. Чиста поверхня зерен шару змочується власним розплавом без необхідності застосування тих чи інших флюсів.

Однорідність сплавів, які поєднують в один біметалевий виливок, дає можливість отримати з'єднання з відсутністю крихких фаз в перехідній зоні, що повною мірою забезпечує високу міцність біметалевого з'єднання на відміну від виробництва біметалів із різнорідних матеріалів [44, 45].

За результатами багатьох досліджень, а особливо роботи [18], можна зробити висновок, що перехідна зона з'єднання між сталями, чавунами або між сталлю та чавуном найчастіше являє собою плавний перехід від структури одного сплаву до структури іншого без межі розділу.

1.3 Технологічні варіанти виготовлення шаруватих виливків та їх особливості

На основі проведеного аналізу літературних джерел можна стверджувати, що виготовлення шаруватих виливків за різними ливарними технологіями зводиться до наступних принципових варіантів:

- матеріал одного з шарів перебуває у твердому стані та на нього доливають рідкий матеріал іншого;
- матеріал одного з шарів перебуває у рідкому (рідко-твердому) стані та на нього доливають рідкий матеріал іншого.

Використання твердої заготовки для першого шару потребує певних технологічних операцій її підготовки до заливання, на відміну від іншого варіанту. Застосування одного з варіантів виготовлення біметалевих або шаруватих виливків обумовлює як технологічні особливості процесів, так і прогнозовані параметри перехідної зони.

Зокрема, за результатами досліджень [22] виготовлення біметалевого виливка із вуглецевої сталі та хромистого чавуну за варіантом заливання рідкого чавуну на тверду сталеву заготовку встановлено, що температура контактної поверхні перевищує температуру солідус розплаву, а у зоні взаємодії твердий-рідкий метал відбувається перерозподіл хімічних елементів, наприклад, вуглецю, кремнію, хрому тощо. Насичення металу-основи вуглецем призводить до зниження температури солідус сталі і, як наслідок, до її підплавлення і розчинення в рідкому чавуні, а розмір перехідної зони залежить від швидкості розчинення та дифузійного масопереносу на межі поділу фаз і у середньому становить 0,4 мм.

У науковій літературі висвітлено численні методи отримання біметалевих та багатошарових литих виробів заливанням рідкого металу на тверду заготовку. За своїми технологічними можливостями, номенклатурою виливків, видами сплавів, що з'єднуються, ці методи можна вважати практично універсальними [1, 5, 8, 10-12, 23].

Відомий спосіб [23] одночасного виготовлення декількох біметалевих виливків, базові заготовки яких розташовують в порожнині ливарної форми та заливають розплавом, який послідовно заповнює кожен секцію до рівня, що забезпечує покриття контактних поверхонь. Після заповнення контактних поверхонь здійснюють остаточне заливання форми розплавом. У деяких випадках після нагрівання заготовок та утворення перехідної зони між розплавом і матеріалом основного шару, половину або три чверті загальної кількості рідкого металу зливають до плавильного агрегату [23], що істотно покращує економічні показники виробництва біметалевих виливків. Також ефективним є попереднє нагрівання заготовок струмами високої частоти.

Аналіз отриманих результатів дослідниками [27] показав, що з підвищенням температури нагрівання заготовок і температури рідкого чавуну товщина перехідної зони біметалевих пар збільшується (рис. 1.2). При температурі нагріву сталевих заготовок в діапазоні від 600 до 700 °C і температурі рідкого чавуну 1200 °C з'єднання досліджуваних матеріалів повністю відсутнє. Збільшення температури нагрівання заготовки до 800 °C призводить до її часткового з'єднання з чавуном. При цьому перехідна зона характеризується наявністю шлакової плівки та підвищеною пористістю. Починаючи з температури нагрівання 900 °C, спостерігається повне зварювання металу-основи з чавуном на всій поверхні контакту.

Збільшення температури рідкого чавуну зміщує початок з'єднання в область більш низьких температур нагрівання металу-основи.

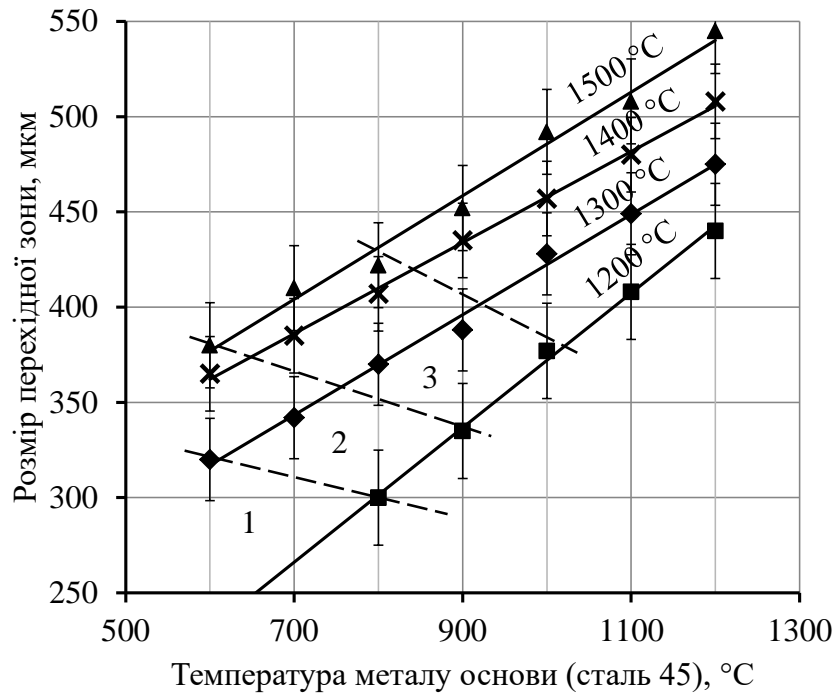


Рис. 1.2. Зміна розміру перехідної зони пари сталь 45 – чавун при різних температурних умовах [27]

Наприклад, за температури чавуну 1400 °C незавершений процес відокремлення шлаку спостерігається лише за температури металу-основи нижче 600-650 °C. На рис. 1.2 пунктирними лініями відокремлені області 1–3, які показують різний характер зв'язку між частинами, що з'єднуються.

При температурних режимах області 1 відсутній будь-який металевий зв'язок між металом-основи (сталь 45) і чавуном, а на контактній поверхні спостерігається невідокремлена шлакова плівка. Температурні режими області 2 характеризуються відокремленням захисної шлакової плівки рідким чавуном і частковим з'єднанням його з металом-основи. В області 3 температурні режими процесу забезпечують повне з'єднання металу-основи і чавуну на всій поверхні контакту [27].

Ефективність використання даних технологій ілюструють автори [9], дані яких підтверджують, що застосування біметалів для виготовлення виливків, які працюють в умовах інтенсивного абразивного та ударно-абразивного зношування, є доцільним з точки зору підвищення технічного ресурсу експлуатації виробів (табл. 1.3).

Таблиця 1.3

Експлуатаційні характеристики робочих органів дробильно-розмелювальних машин, які працюють в умовах абразивного і ударно-абразивного зношування [9]

Назва робочого органу	Технічний ресурс серійних робочих органів		Інтенсивність зношування серійних робочих органів, г/т продукції	Технічний ресурс біметалевих виливків		Інтенсивність зношування біметалевих виливків, г/т продукції
	матеріал	год.		біметалева пара	год.	
1	2	3	4	5	6	7
Била вуглерозмельних млинів теплових електростанцій	сталь 110Г13Л	987	330	сталь 25Л – чавун ЧХ16М2	2962	110
	сталь 70ХЛ	1538	209			
	сталь 25Л – напл. Т-590	1851	176			
Лопатки млинів- вентиляторів	сталь 09Г2С – ППАН - 170	2000	149	сталь 09Г2С – чавун ЧХ16М2	6500	46
	сталь 09Г2С – напл. Т-590	2600	115			
Черв'ячні втулки ліній сушіння і виділення синтетичного чавуну	сталь 12Х18Н9Т – напл. ЦНЧ	4700	–	сталь 12Х18Н10Т – стелліт	9500	–
Лінійки прокатних станів	сталь 20Х2ГМРСЛ – напл. Т-590	1000	–	сталь 20Х2ГМРСЛ – бідулоїд	1400	–

Продовження табл. 1.3

1	2	3	4	5	6	7
Молотки дробарок типу КС-75	сталь 110Г13Л	1500	11,32	сталь 25Л – чавун 300Х20М2	6448	2,64
Молотки дробарок типу ММТ 1300/ 2030/ 735МШ	сталь 110Г13Л	1160	7,90	сталь 25Л – чавун 300Х12Г3М	2900	3,17
Молотки дробарок типу СМД-15	сталь 110Г13Л	620	15,36	сталь 35ХГСЛ – чавун 300Х12Г3М	2500	3,84
Била роторних дробарок Р1000х500	сталь 110Г13Л	480	15,66	сталь 20Л – чавун 300Х12Г3М	1440	5,22
Била роторних дробарок Р1500х500	сталь 110Г13Л	385	16,54	сталь 35Л – чавун 300Х12Г3М	1080	5,91
Била роторних дробарок ДР1500х1000	сталь 110Г13Л	288	18,30	сталь 35Л – чавун 300Х12Г3М	720	7,32
Реверсивні била роторних дробарок Н-С1-130-125LT	сталь 125Г18Х2МНА	189	8,64	чавун 300Х20М2 – сталь 25ГСЛ – чавун 300Х20М2	756	2,16
Відбійні плити роторних дробарок Н-С1-130-125LT	сталь 38Х3МЛ	285	11,34	сталь 25Л – чавун 300Х12Г3М	1200	2,70
Футерувальні плити роторних	сталь 38Х3МЛ	373	10,71	сталь 20Л – чавун	1680	2,38

дробарок Н-С1-130-125LT				300X12Г3М		
-------------------------	--	--	--	-----------	--	--

Продовження табл. 1.3

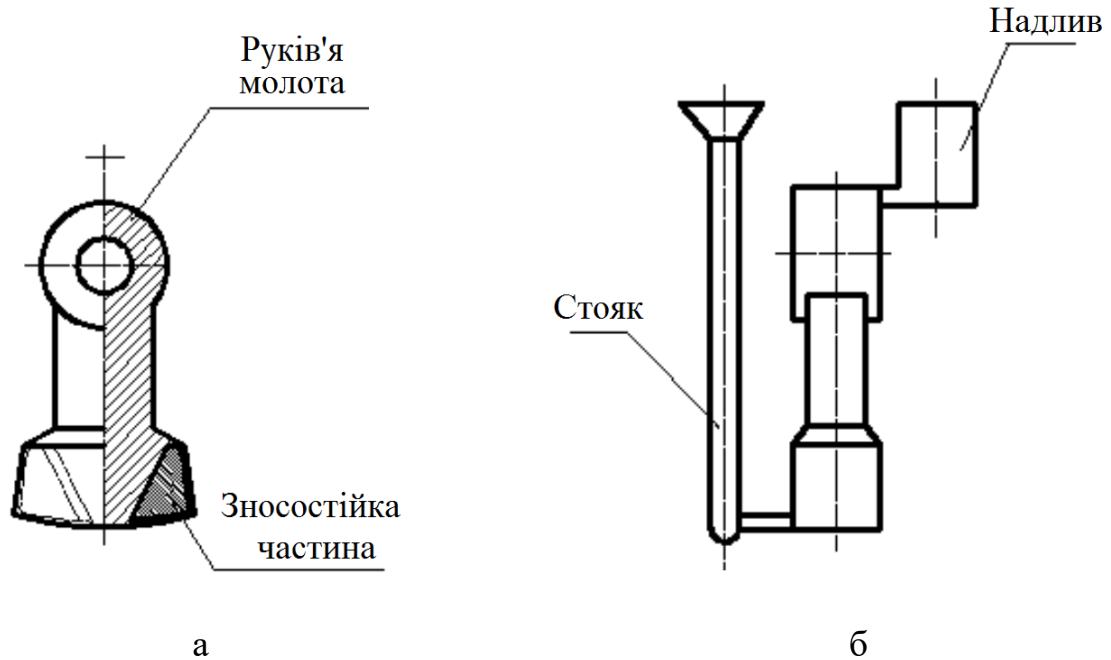
1	2	3	4	5	6	7
Відбійні плити роторних дробарок ОДВ 1050х1000	сталь 110Г13Л	274	22,68	сталь 30Л – чавун 300X12Г5	960	6,48
Реверсивні біла роторних дробарок SBM	сталь 110Г13Л	86	9,40	чавун 300X20М2 – сталь 25Л – чавун 300X20М2	275	2,94
Борошномельні вальці	білий чавун – сірий чавун*	9667	0,0108	чавун 350ХН2 – чавун СЧ 20	14500	0,0072

* – сплави, які застосовує фірма «BUHLER»

В тому числі до першого варіанту виробництва біметалевих виробів з використанням твердого матеріалу основи відносять методи їхнього отримання на морожуванням [23, 37], характерною особливістю яких є попереднє виготовлення заготовок у вигляді стрічки, прутка, дроту, їх нагрівання і наступне пропускання через ванну з розплавом рідкого металу іншого складу. У процесі руху заготовок через ванну рідкого металу відбувається руйнування окисних плівок на межі контакту, розплав змочує тверду основу, в результаті чого виникають умови для протікання дифузійних процесів, а спеціальні пристрої забезпечують високу швидкість охолодження покриття. Залежно від конкретного технологічного процесу, можна отримувати одно- або двостороннє покриття. До методів об'ємного на морожування слід віднести також заливання металу між двома рухомими стрічками, які разом з металом проходять через валки та охолоджуються. Зазначені методи застосовуються при масовому виробництві біметалів в автомобілебудуванні, машинобудуванні, сільському господарстві, енергетиці та інших галузях промисловості [23].

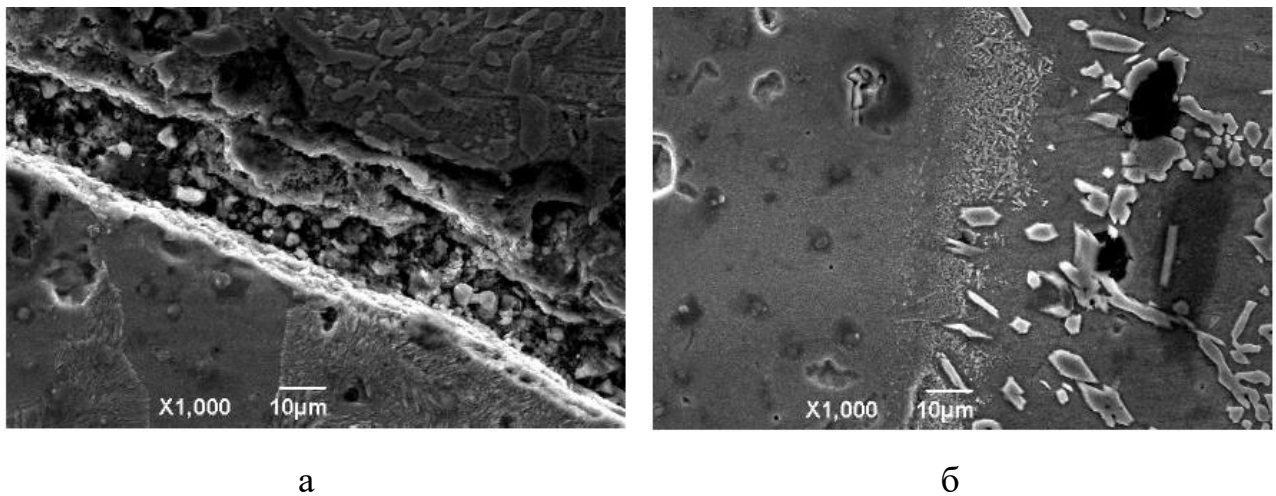
Дослідниками [46] розроблено технологію виготовлення біметалевих бил (рис. 1.3) молоткових дробарок із високомарганцевої сталі та високолегованого хромистого чавуну. Конструкція даного молотка передбачає два вкладиші із попередньо термообробленого зносостійкого високолегованого хромистого чавуну в нижній частині молотка, які встановлюються у ливарну форму підігрітими та мають у своїй конструкції паз типу хвіст ластівки. Дана технологія забезпечує з'єднання матеріалів не лише за рахунок змочування та дифузії, а й механічного затискання. Як видно із зображень мікроструктури перехідної зони (рис. 1.4), чим вища температура заливання шару з високомарганцевої сталі, тим менше дефектів у перехідній зоні. При цьому підвищена температура чавунних вкладишів зменшує температурний градієнт між матеріалами та мінімізує ефект холодильника для розплаву. Усе це сприяє підвищенню якості з'єднання матеріалів у перехідній зоні, що робить зв'язок більш міцним. Однак автори зауважують, що надмірне підвищення температури заливання сталі призводить до появи закритих усадкових раковин

та пористості у перехідній зоні, що пов'язано із пізнім виділенням газів. З даними дефектами борються шляхом прогрівання чавунних вкладишів перед заливанням природним газом до температури понад 600 °С.



а – загальний вигляд біметалевого молотка; б – схема ливникової системи для виготовлення біметалевого молотка

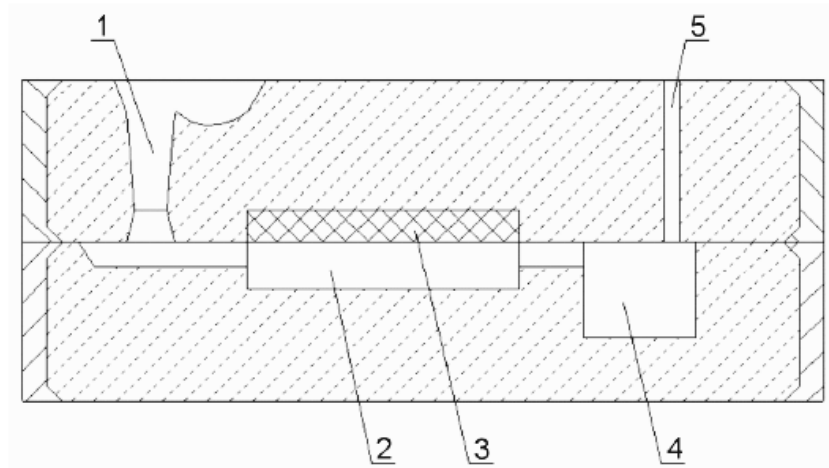
Рис. 1.3. Біметалевий молоток для дробарки [46]



а – температура заливання 1500 °С; б – температура заливання 1600 °С

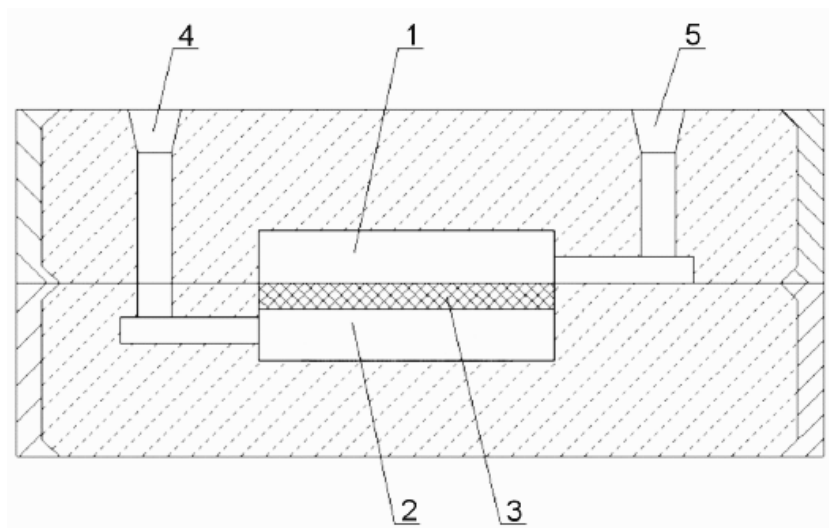
Рис. 1.4. Мікроструктура перехідної зони молотка [46]

Відомі технології виготовлення зносостійких біметалів шляхом заливання рідкого чавуну на тверду сталеву плиту, встановлену у робочу порожнину ливарної форми, як через одну (рис. 1.5) так і через окремі (рис. 1.6) незалежні ливникові системи для забезпечення підігрівання сталеві плити [47, 48].



1 – ливникова система; 2 – робоча порожнина ливарної форми;
3 – сталеві плита; 4 – резервуар для зливання рідкого чавуну; 5 – випор

Рис. 1.5. Технологія виготовлення біметалевого виливка з використанням однієї ливникової системи [47]



1 – робоча порожнина ливарної форми; 2 – порожнина ливарної форми
(для підігрівання); 3 – сталеві плита; 4, 5 – незалежні ливникові системи

Рис. 1.6. Технологія виготовлення біметалевого виливка з використанням двох незалежних ливникових систем [47]

На основі наведених технологій автори робіт [28, 29, 49] провели дослідження впливу товщини сталеві пластина на якість отриманого біметалу. За матеріал робочої частини обрано дві плити хромистої сталі товщинами 2 та 5 мм, які заливали рідким чавуном за схемою, наведеною на рис. 1.7. Для досліджень було використано модель прямокутної форми розмірами $125 \times 105 \times 40$ мм, сталеві плити попередньо не підігрівали, але проводили активацію поверхні, чавун заливали за температури 1450°C . В результаті було отримано біметалевий матеріал із феритною структурою легованої сталі у робочій частині та структурою сірого чавуну у матричній частині. Якість перехідної зони біметалевого виливка оцінювали за допомогою ультразвукового неруйнівного контролю та дослідженням структури. Результатами досліджень було підтверджено, що застосування плити товщиною до 2 мм призводить до її деформації під час заливання, що унеможлиблює її промислове застосування, на відміну від плити товщиною 5 мм. Результати робіт [28, 29, 49] узгоджуються з результатами робіт [5, 6].

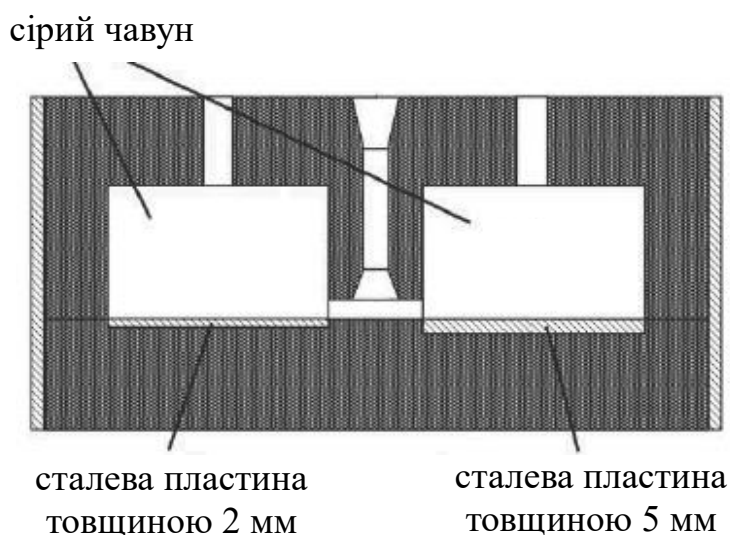
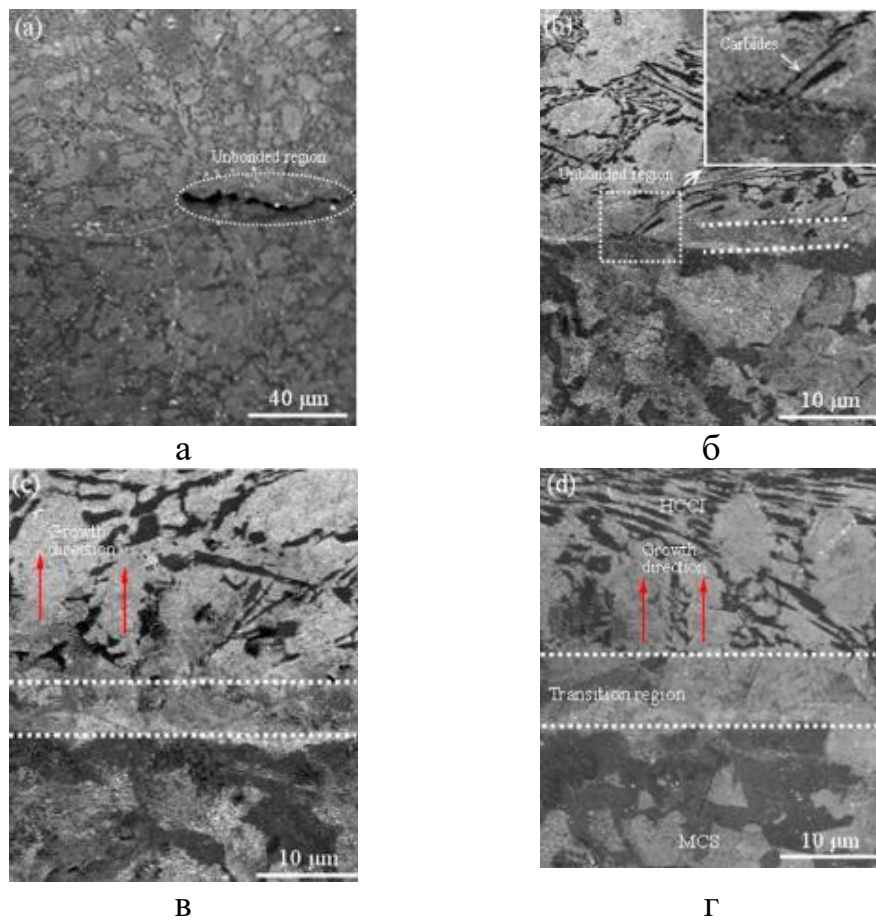


Рис. 1.7. Поперечний переріз ливарної форми готової для заливання чавуну [29]

У роботі [5] автори використали технологію заливання рідкого чавуну на тверду сталеву плиту для дослідження впливу об'ємного співвідношення між

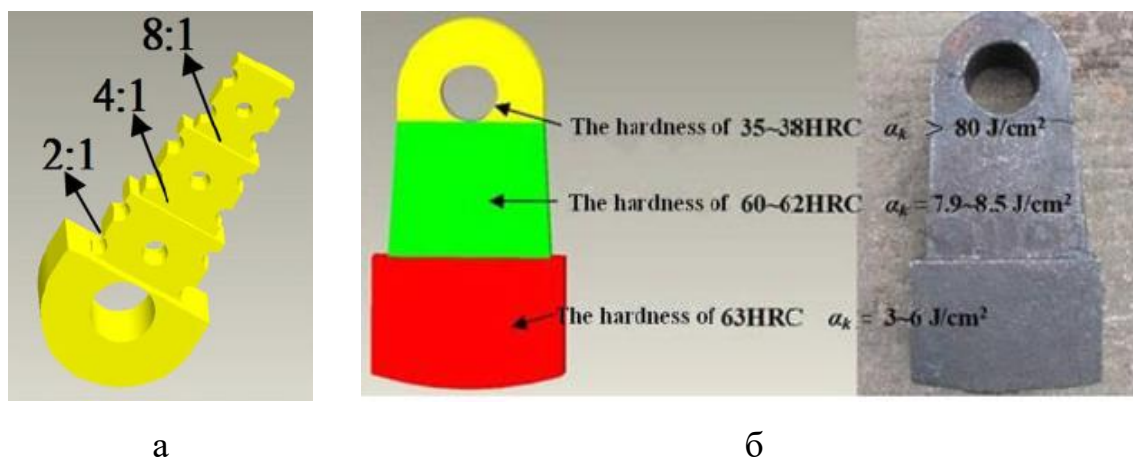
рідким чавуном та твердою сталеву плитою на механічні властивості перехідної зони та наявність у ній дефектів при виготовленні біметалевого виливка. Встановлено, що за співвідношення чавун – сталеву плиту 6:1 (рис. 1.8, а, б) у перехідній зоні наявні дефекти пов’язані з відсутністю з’єднання між шарами. Збільшення даного співвідношення до 10:1 (рис. 1.8, в) та 12:1 (рис. 1.8, г) унеможливилося виникнення зазначених дефектів та збільшує дифузійну активність компонентів сплавів, що призводить до збільшення ширини перехідної зони. Показано, що мікротвердість у окремих шарах та перехідній зоні пропорційна вмісту вуглецю, який утворює власні карбіди у мікроструктурі досліджених сплавів. Встановлено, що збільшення співвідношення рідина – тверда речовина призводить до збільшення тимчасового опору при зсуванні від 150 до 260 МПа.



а, б – 6:1; в – 10:1; г – 12:1

Рис. 1.8. Перехідні зони зразків у литому стані з різним об’ємним співвідношенням чавуну та сталеву плити [5]

Схоже дослідження проведено авторами роботи [50] для виготовлення била молоткової дробарки. Тверду частину з низьковуглецевої сталі заливали спочатку високолегованою хромистою сталлю, а потім високолегованим хромистим чавуном із різними об'ємним співвідношенням рідини та твердої речовини (рис. 1.9). Встановлено, що металевий зв'язок у перехідній зоні забезпечується при співвідношенні 8:1, при цьому тверду частину із низьковуглецевої сталі перед заливанням відшліфували, нанесли шар флюсу на основі бури та підігріли до температури від 300 до 600 °С. Високолеговану хромисту сталь залили за температури 1565 °С, а високолегований хромистий чавун – 1420 °С.



а – вигляд твердої частини з високолегованої хромистої сталі із вказаними об'ємним співвідношенням рідини та твердої речовини;
б – загальний вигляд била та його механічні властивості у окремих частинах

Рис. 1.9. Конструкція била молоткової дробарки [50]

Для виготовлення виливків, які працюють в умовах зношування, використовують також і технології, за яких у ливарну форму по чергово заливають розплави необхідного хімічного складу [14, 23, 51-58].

Для вирішення проблеми інтенсивного зношування частин пульпових насосів, які працюють на цементних заводах Lafarge, у Греції [14] розроблено метод їхнього виготовлення шляхом лиття з біметалів. Матеріалом зносостійкого шару було обрано високолегований хромистий чавун, який

додатково обробляли частинками на основі карбіду вольфраму на глибину від 5 до 8 мм зі сторони робочої поверхні, внаслідок часткового розчинення яких і результуючої дифузії таких елементів, як W, Co, Fe, C і Cr, у робочому шарі виливка утворилися карбіди, що містять Fe, Cr, W та Co. Матеріалом основи було обрано низьковуглецеву сталь. Сутність технології полягала у поетапному заливанні обох матеріалів виливка. На дно ливарної форми заливали високолегований хромистий чавун, який взаємодіяв з частинками карбіду вольфраму, попередньо розташованими у робочій порожнині форми. Після витримання від 2 до 4 хв. (температура чавуну, залитого у форму, повинна була триматися на рівні понад 1100 °С) через іншу ливникову систему форму доливали низьковуглецевою сталлю. Сегменти початковою масою 525 кг з кожного типу матеріалу вилучено для огляду після використання протягом 127 діб впродовж 22 год. на добу (термін служби для такої деталі із класичного матеріалу), що передбачало розпилення 30 т/год гарячої золи, всього 83 820 т пилоподібної золи. За результатами випробувань (рис. 1.10) встановлено, що інтенсивність зношування біметалевого виливка у 17 разів нижча.



а – сегмент, виготовлений з хромистого чавуну; б – біметалевий сегмент, зміцнений частинками WC

Рис. 1.10. Плита пульпового насоса після чотирьох місяців експлуатації [14]

Відомо [59-62], що для виробництва чавунних виливків з окремих марок сірого чавуну з пластинчастим графітом, чавуну з вермикулярною формою графіту, високоміцного чавуну з кулястим графітом промисловістю

використовуються технології модифікування. Ці технології дозволяють забезпечувати кристалізацію чавуну необхідним чином для утворення бажаної структури у виливку, що можливо використати для виробництва двошарових чавунних виливків із різною структурою.

1.4 Технологічні методи модифікування чавунів

Відомо, що умови плавлення та кристалізації чавуну впливають як на морфологію графітових вкраплин, так і на структуру металевої матриці [63, 64].

Для зміни умов кристалізації розплаву чавуну та забезпечення утворення у виливку необхідної структури використовують технологічну операцію модифікування. Використання модифікування дозволяє отримувати виливки з кулястою та вермикулярною формами графіту, також його використовують для запобігання утворенню небажаного вибілення під час виробництва окремих марок сірих чавунів. Аналіз світового виробництва чавуну [65, 66] показує, що для отримання у виливках вкраплин графіту кулястої або вермикулярної форми в якості основного елемента-модифікатора застосовують магній, проблеми введення та засвоєння якого є актуальними [59, 67, 68] внаслідок його високої хімічної активності та низької, для використання при модифікуванні чавунних сплавів, температури кипіння. Наведені недоліки призводять до низького засвоєння магнію розплавом, значного піроефекту та виділення оксидів магнію у вигляді диму, що, як наслідок, спричиняє підвищені витрати модифікаторів та погіршення умов праці в чавуноливарних цехах, особливо при застосуванні в якості модифікатора чистого магнію. Слід зазначити, що ці недоліки повною мірою проявляють себе лише під час модифікування у відкритому ковші. Для зменшення впливу вищевказаних недоліків у світовій промисловості застосовують модифікатори, які містять у своєму складі магній на рівні 3-9 % [65]. Менші значення вмісту магнію у модифікаторі застосовують для виробництва чавуну з вермикулярною формою графіту, більші – з кулястою. Також розроблені технології ковшового модифікування, модифікування із

застосуванням спеціальних конвертерів, які дозволяють покращити ступінь засвоєння магнію від 10-20 % під час модифікування у відкритому ковші до 40-75 % [69, 70]. Загалом методи оброблення розплаву чавуну магнієм класифікують дослідники [66] та розділяють їх на методи модифікування чистим магнієм та модифікаторами, які вміщують магній (рис. 1.11).

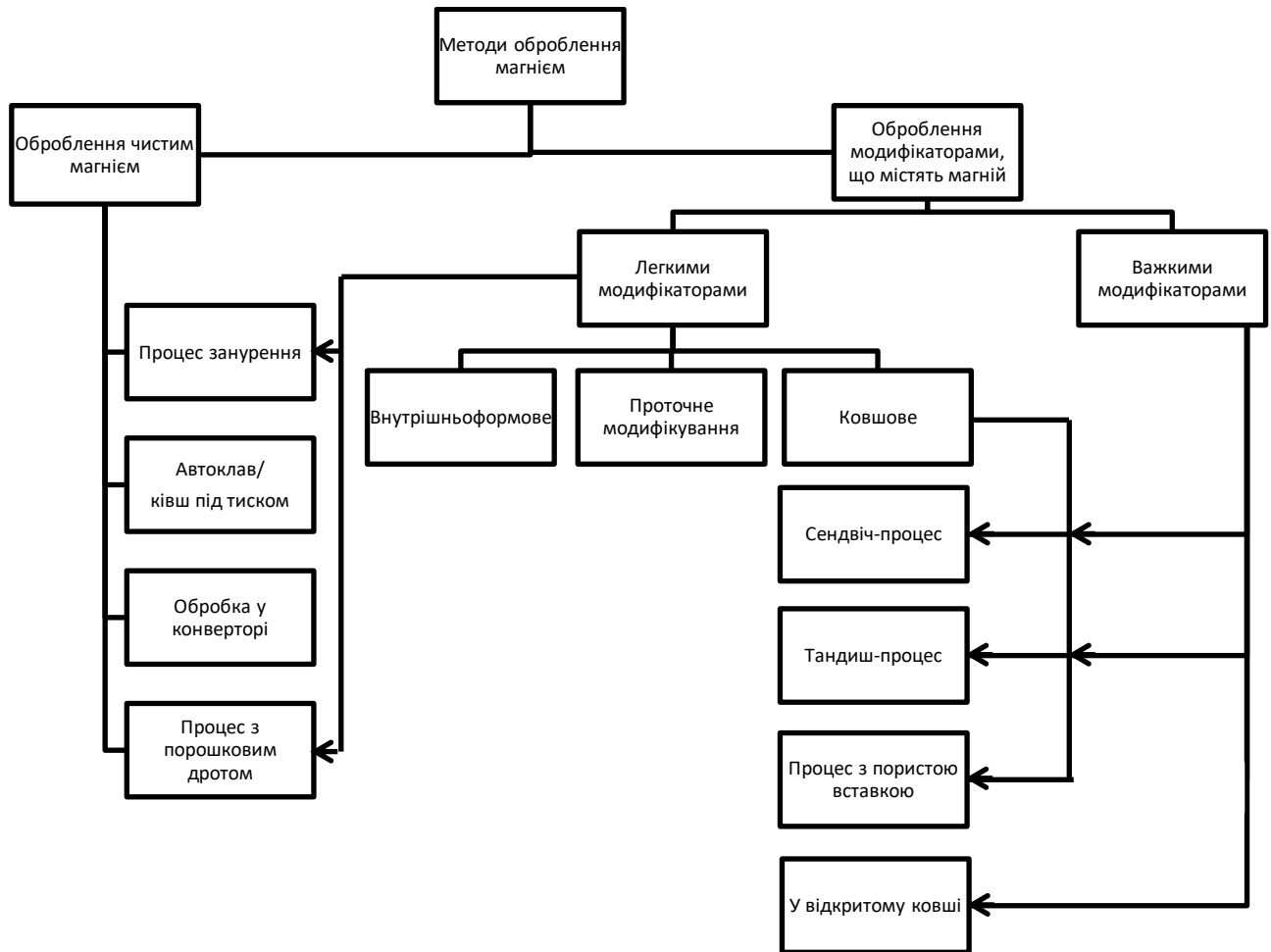


Рис. 1.11. Класифікація існуючих методів оброблення розплавів магнієм для виробництва виливків із високоміцного чавуну з кулястим графітом [66]

Окремо слід відзначити один із методів, який належить до так званого «пізнього» модифікування [71-75] чавунного розплаву безпосередньо у ливарній формі – Inmold-процес. Сутність методу полягає у розташуванні спеціальної порожнини, яку називають реакційною камерою або реактором [76-84], заповненої розрахунковою кількістю подрібненого модифікатора, у ливниковій системі (рис. 1.12).

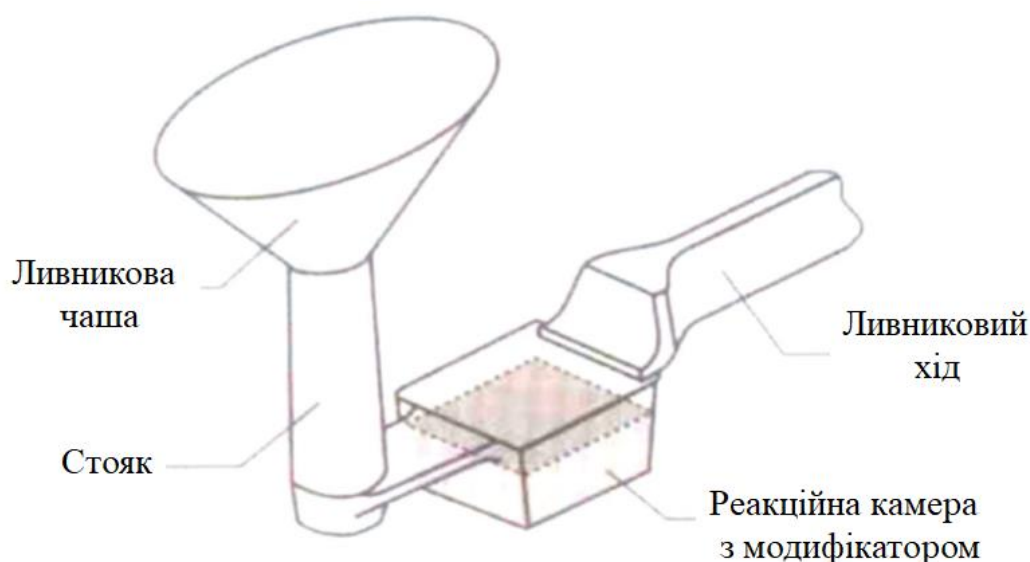


Рис. 1.12. Схема Inmold-процесу [77]

За даними [65, 71, 85], аналіз тенденцій розвитку технологій виробництва високоміцного чавуну свідчить, що найбільш перспективними є «пізні» методи модифікування, суміщені з операцією заливання ливарних форм. Практична реалізація даного методу дозволяє отримати ряд переваг у порівнянні з іншими, а саме: підвищення ступеню засвоєння магнію до 80-90 % та нівелювання піроефекту за рахунок протікання процесу в реакційній камері ливникової системи з обмеженим доступом повітря, що відзначають й науковці, які досліджують даний метод [69, 86, 87, 88, 89]. При цьому знижується витрата модифікатора, унеможлиблюється виникнення ефекту демодифікування розплаву, з'являється можливість регулювання параметрів модифікування для кожної ливарної форми окремо, відпадає необхідність у капіталовкладеннях на спеціалізоване устаткування для проведення модифікування, покращуються санітарно-гігієнічні умови виробництва.

З аналізу [76, 80, 86, 90, 91] встановлено, що застосування замість ковшового модифікування Inmold-процесу впливає на структуроутворення у чавунних виливках. Використання останнього дозволяє підвищити ступінь сфероїдизації вкраплин кулястого графіту, а також збільшити відсоток феритної складової у металевій матриці чавуну (рис. 1.13).

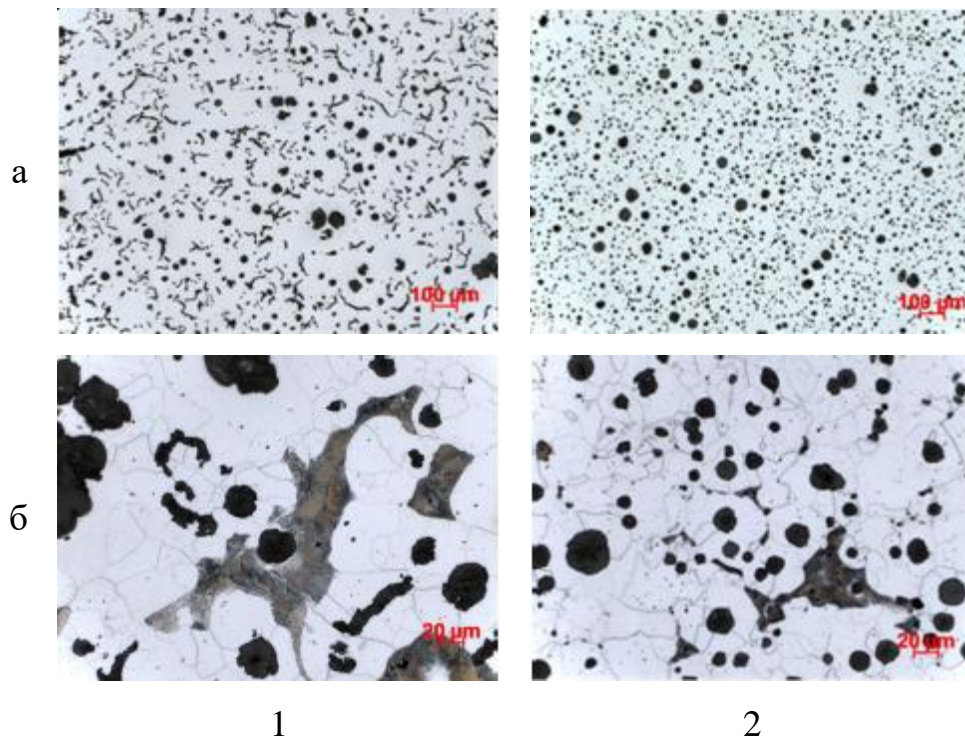


Рис. 1.13. Нетравлена (а) та травлена (б) мікроструктура високоміцних чавунів, отриманих ковшовим модифікуванням (1), та з використанням Inmold-процесу (2) [86]

Хоча окремі дослідники [92] виділяють й недоліки процесу внутрішньоформового модифікування чавуну, такі як забруднення поверхневих шарів виливка продуктами модифікування, провівши експерименти з чавуном (табл. 1.4). На практиці мінімізують вплив даного недоліку або усувають його повністю за рахунок розроблення технології ливарної форми, яка враховує особливості застосування Inmold-процесу.

Таблиця 1.4

Хімічний склад дослідженого чавуну [92]

	Основні компоненти розплаву, %						
	C	Mn	Si	P	Mo	S	Mg
Базовий розплав	3,65	0,089	2,87	0,03	0,001	0,015	—
Чавун у виливку	3,64	0,087	2,94	0,03	0,001	0,012	0,041

Важливим фактором при застосуванні методу внутрішньоформового модифікування є вибір вихідних шихтових матеріалів. Особливо це стосується вмісту сірки [93], який у готовому розплаві чавуну, за різними даними, не повинен перевищувати 0,015-0,02 % [59, 62, 67], оскільки відбувається зниження модифікувальної дії магнію внаслідок його витрати на утворення хімічної сполуки MgS . Залежно від процесу плавлення і складу шихтових матеріалів вміст S в розплаві може коливатися, і її зміна від 0,01 % до 0,015 % призводить до зменшення кількості залишкового магнію у виливку від 0,035 % до 0,0312 % [67]. А, як відомо [62], для отримання високоміцного чавуну з кулястим графітом у виливку вміст залишкового магнію повинен знаходитися в діапазоні 0,03-0,07 %.

Крім того, фахівці компанії Sorelmetal Technical Service Rio Tinto Iron & Titanium [67] відзначають необхідність чіткого дотримання технологічного процесу модифікування та ілюструють результати, отримані при відхиленнях від нього за різними параметрами, що співпадає з точкою зору українських науковців [85]. При цьому на прикладі ковшового модифікування розрахунок необхідної кількості магнієвого модифікатора для отримання високоміцного чавуну [67] рекомендують проводити за наступною формулою:

$$W_{FeSiMg} = W_{ladle} \times \frac{(Mg_{final} + 0,76 + (S_i - S_f) + 10^{-3}t)}{\%Mg_{FeSiMg} \times R} \times (T^{\circ}C/1450)^2 \quad (1.6)$$

де W_{FeSiMg} – маса $FeSiMg$, кг;

W_{ladle} – маса розплавленого металу у ковші, кг;

Mg_{final} – кількість Mg у розплавленому чавуні після обробки, %;

$\%Mg_{FeSiMg}$ – вміст Mg у $FeSiMg$ сплаві, %;

S_i – вихідна (до обробки Mg) кількість сірки у чавуні, %;

S_f – кінцева (після обробки Mg) кількість сірки у чавуні, %;

t – час між обробкою та початком розливання, хв;

T – температура розплаву, $^{\circ}C$;

R – ступінь засвоєння Mg , %.

За результатами роботи [67] автори відзначають, що навіть незначне відхилення розрахункових параметрів технологічного процесу від фактичних призводить до підвищення собівартості технології та зниження якості модифікування. Досвід українських науковців [94] показує, що дотримання технологічних умов дозволяє виготовляти виливки з високоміцного чавуну з товщиною стінки 2,5-3,0 мм без утворення цементитної фази з подрібненою структурою у литому стані.

Важливим фактором при розробленні ливарної технології із застосуванням Inmold-процесу є проектування ливникової системи, яка, в першу чергу, повинна забезпечувати розчинення модифікатора в потоці чавуну та уловлювання продуктів реакції розплаву чавуну з модифікатором. Дослідження стосовно вибору геометричної форми реакційної камери, варіанту підведення немодифікованого та відведення модифікованого розплаву проводилося численними дослідниками [95-97].

Співробітники The University of Alabama, Comanche Technologies та Ohio State University [96], взявши за основу використання Inmold-процесу, розробили технологію «direct-pour container» для виробництва виливків з високоміцного чавуну (рис. 1.14). Для коригування конфігурації ливникової системи та відпрацювання режимів лиття дослідники використали метод моделювання процесу заливання, за допомогою якого забезпечили необхідну швидкість заливання розплаву на рівні 2,2-2,7 кг/с. Результатом їх роботи стала технологія виготовлення тонкостінних виливків (рис. 1.14) з високоміцного чавуну масою близько 45 фунтів (20 кг) з використанням модифікатора FeSiMg6 у кількості 1,3 %, а температуру заливання витримувати в діапазоні 1460-1470 °C.

В Politechnika Łódzka проведено дослідження впливу розмірів та конфігурації реакційних камер [97] на процес сфероїдизації у чавуні при внутрішньоформовому модифікуванні. Дослідження проводили на реакційних камерах у формі паралелепіпеда, циліндра та напівкулі. Застосування фізичного моделювання з використанням води замість розплаву чавуну та гранул

високомолекулярного пластику в якості частинок модифікатора показало різний механізм взаємодії у реакційних камерах різної форми (рис. 1.15).

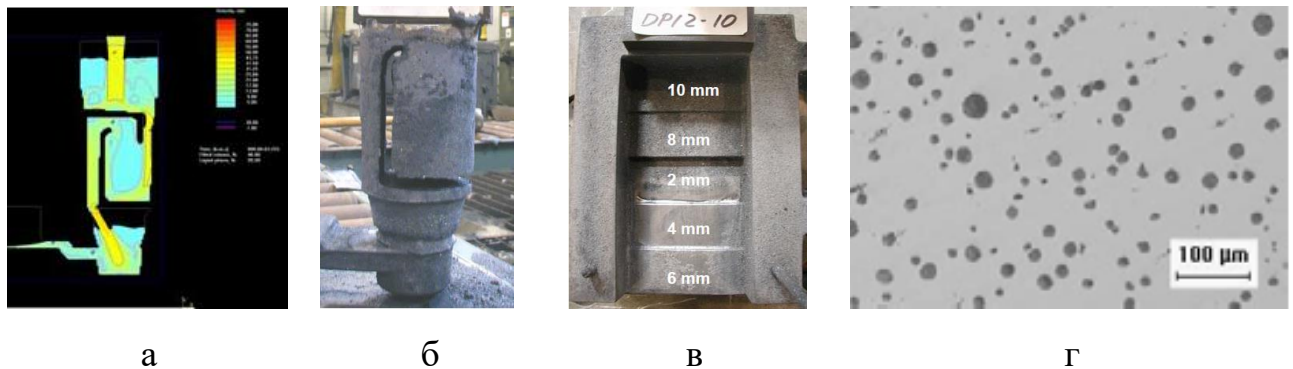


Рис. 1.14. Моделювання (а), ливникова система (б), виливок (в) та мікроструктура у виливку з перерізом стінки 2 мм (г), отриманому за технологією direct-pour container [96]

Слід зазначити, що мікроструктура чавуну безпосередньо у реакційній камері відрізняється за висотою перерізу та залежить від її конфігурації. Використання сферичної реакційної камери забезпечує найкращу сфероїдизацію графіту серед досліджених варіантів. Дослідження щодо впливу форми реакційної камери проводилися й українськими дослідниками [82, 95, 98], які відзначають, що найкращі результати були одержані з використанням реакційної камери циліндричної або кубічної форми.

Однак результати експериментів [97], проведених з використанням чавуну зі вмістом 3,65 % C; 2,81 % Si; 0,49 % Mn; 0,008 % P; 0,005 % S та залишкового магнію у виливках на рівні 0,052 % Mg, який забезпечили використанням магнієвої лігатури у кількості 1,0 %, демонструють незначну різницю мікроструктури за кількістю феритної складової металевої матриці та розмірами графітових вкраплин кулястої форми у виливках розмірами 40×40×40 мм (рис. 1.16). При цьому процес сфероїдизації графіту у виливках проходить у повному обсязі при використанні будь-якого з трьох варіантів конфігурації реакційної камери, що пояснюють перемішуванням розплаву у формі після модифікування.

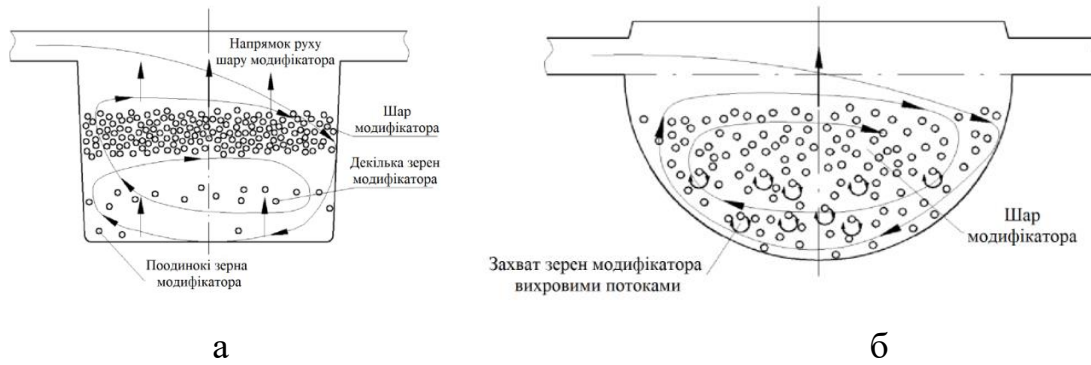


Рис. 1.15. Схема взаємодії розплаву та модифікатора в реакційних камерах у формі паралелепіпеда та циліндра (а) і напівкулі (б) за результатами фізичного моделювання [97]

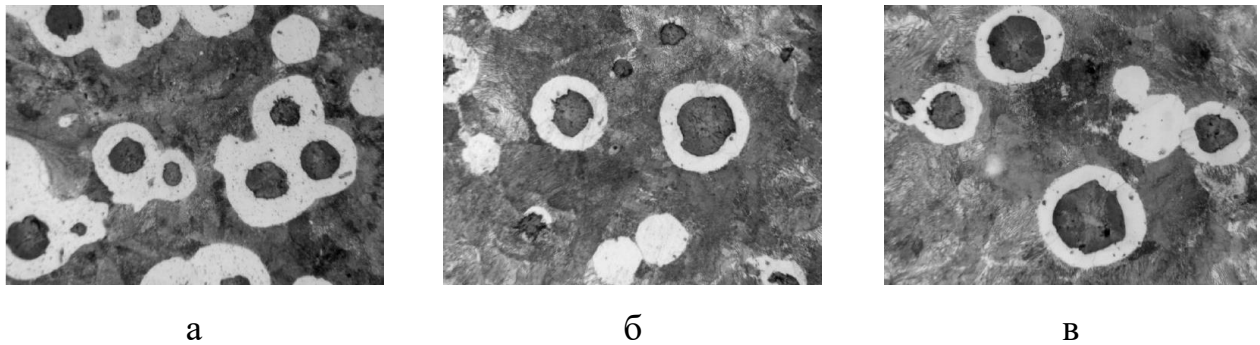


Рис. 1.16. Мікроструктура (×200) виливків, отриманих за Inmold-процесом при використанні реакційних камер у формі паралелепіпеда (а), циліндра (б) та напівкулі (в) [97]

В роботі [76] проведено аналіз впливу температури заливання розплаву (рис. 1.17, а) та гранулометричного складу феросилікомагнієвого модифікатора (рис. 1.17, б) на швидкість його розчинення у чавуні, а також конструкції шлаковловлювача та відношення площ поперечного перерізу окремих елементів ливникової системи на очищення модифікованого розплаву від шлаку.

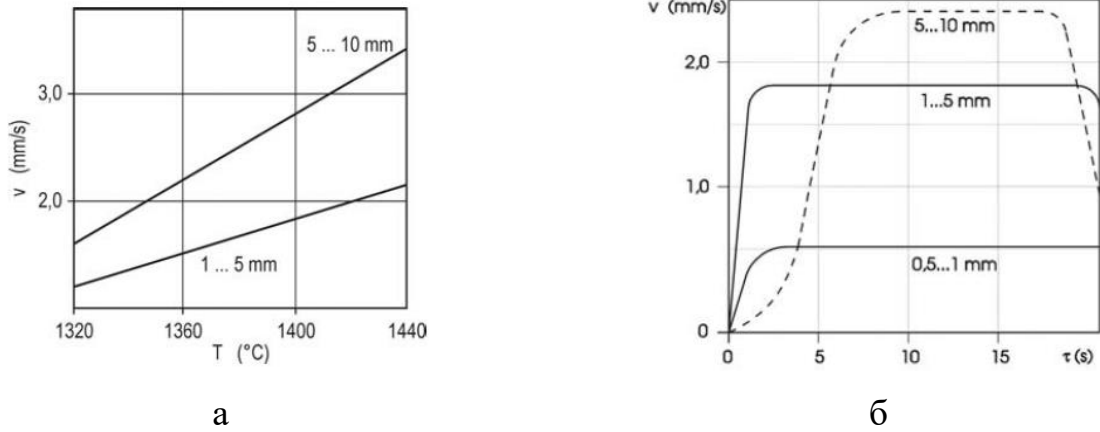


Рис. 1.17. Залежність впливу температури (а) та часу (б) заливання чавуну в залежності від гранулометричного складу модифікатора на швидкість його розчинення у чавуні [76]

Авторами роботи [76] встановлено, що при відхиленні температури розплаву на ± 40 °C від номінальної може призвести до відхилення вмісту Mg в розплаві на $\pm 0,007$ % при використанні модифікатора з розміром фракції від 1 до 5 мм, та на $\pm 0,0086$ % – для фракції від 5 до 10 мм. Якщо гранулометричний склад модифікатора знаходиться в межах від 1 до 5 мм, що є оптимальним для дрібних виливків, то після першої секунди від початку модифікування швидкість розчинення стабілізується в межах від 1,5 до 2 мм/с і залежить тільки від температури розплаву (див. рис. 1.17, б).

Частинки модифікатора розмірами до 1 мм, включно з пилоподібною складовою, практично не розчиняються у потоці чавуну, їх верхній шар спікається та перешкоджає потраплянню чавуну до решти модифікатора, яка залишається на дні реакційної камери без змін. Якщо використовувати модифікатор з розмірами частинок близько 10 мм, то розплав змочує весь його об'єм, який починає розчинятися із затримкою у декілька секунд, досягаючи швидкості розчинення 2-3 мм/с. Такий розмір частинок модифікатора застосовують при виробництві виливків масою понад 25 кг. Хоча модифікування більших об'ємів розплаву може усунути початкову затримку розчинення, використання модифікатора з розмірами частинок понад 10 мм все ж проблематично. Швидкість течії розплаву в реакційній камері незначно

впливає на швидкість розчинення модифікатора, а отже, подана кількість активних елементів в розплав за одиницю часу змінюється мінімально [76, 83].

Також дослідженнями [76] встановлено необхідність використання звужувальної ливникової системи із певним співвідношенням перерізів її елементів (рис. 1.18), що запобігає доступу повітря та збільшує ефективність вловлювання продуктів реакції модифікування.

Ливникова система з використання гравітаційного шлаковловлювача (рис. 1.18, б) замість відцентрового (рис. 1.8, а) виправдовує себе при виготовленні виливків масою до 25 кг [76].

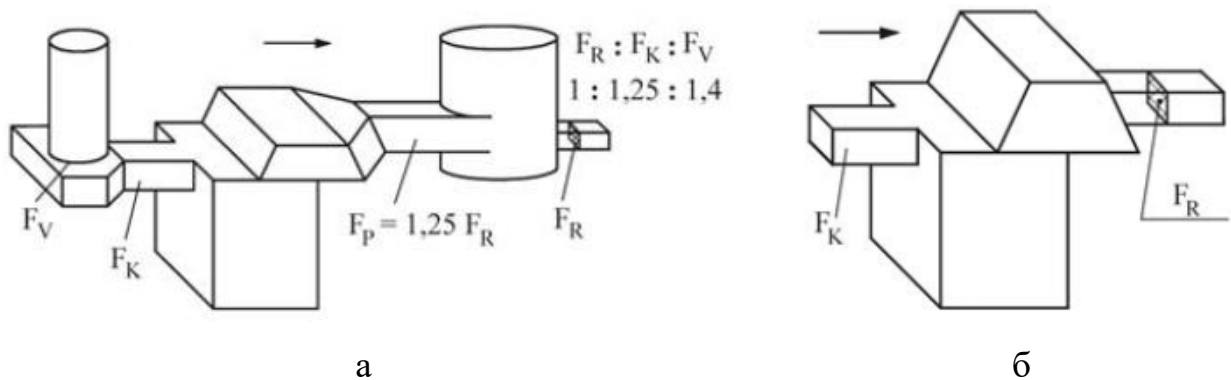


Рис. 1.18. Реакційні камери з відцентровим (а) та гравітаційним (б) шлаковловлювачем [76]

Комплексне дослідження впливу кількості феросилікомагнієвого модифікатора, розміру його фракції та конфігурації ливникової системи також проведено дослідниками [99, 100]. Кількість феросилікомагнієвого модифікатора змінювали в діапазоні від 0,5 до 1,5 %, а його гранулометричний склад – від 3 до 15 мм. Досліджували кубічну та циліндричну форму реакційної камери з прямоточним (рис. 1.19, а) та дотичним (рис. 1.19, б) розташуванням ливникових ходів. Максимальну ступінь сфероїдизації (98 %) та кількість вкраплин кулястого графіту на квадратний міліметр (140) було отримано при дотичному розташуванні ливникових ходів відносно кубічної реакційної

камери та кількості феросилікомагнієвого модифікатора 1,25 % при розмірі його частинок близько 10 мм [99].

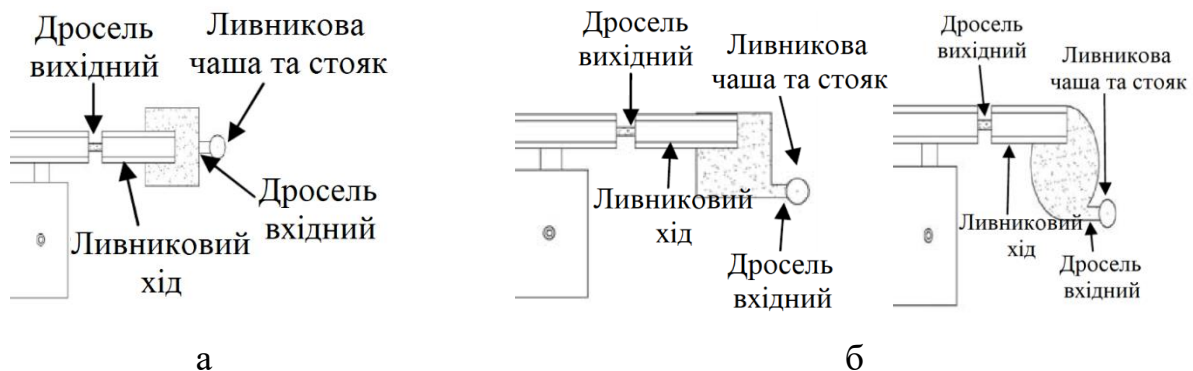


Рис. 1.19. Схеми ливникових систем з прямоточним (а) та дотичним (б) розташуванням ливникових ходів відносно реакційної камери [99]

Проведеним аналізом літературних даних встановлено, що технологія внутрішньоформового модифікування чутлива до зміни параметрів технологічного процесу, які встановлюють окремо для конкретної технології виробництва виливків. Результати досліджень стосовно форми реакційної камери дещо різняться. Найчастіше застосовують кубічну, циліндричну або сферичну форму реакційної камери із застосуванням відцентрового або гравітаційного шлаковловлювача.

Висновки та постановка задач дослідження

За результатами аналізу літературних джерел можна зробити наступні висновки:

1. Актуальними проблемами промисловості України є підвищення експлуатаційного ресурсу деталей машин і механізмів, робота яких проходить в умовах інтенсивного абразивного та ударно-абразивного зношування. Цього можна досягти заміною дорогих ливарних сплавів, що вміщують V, Mo, Ni, Cr тощо, високоефективними дешевими зносостійкими матеріалами.

2. Найперспективнішим напрямком у вирішенні цієї проблеми є використання шаруватих виливків, які поєднують у собі комплекс високих технологічних, механічних та експлуатаційних показників з диференційованою структурою по їх перерізу, що неможливо досягти під час виготовлення монометалевих виробів.

3. Однією з основних вимог, яку висувають до шаруватих виливків, – міцний зв'язок між шарами по всій поверхні з'єднання. Необхідними умовами з'єднання шарів є мінімізація впливу перешкод між ними у вигляді оксидних плівок та зближення атомів металів, що сполучаються, на відстань дії міжатомних сил. Виконання першої умови забезпечується підбором температурно-часових параметрів технологічного процесу, другої – змочуванням одним рідким металом іншого.

4. Застосування однорідних сплавів, які поєднують в один шаруватий виливок, дає можливість отримати якісне з'єднання матеріалів у перехідній зоні, що повною мірою забезпечує високу міцність з'єднання на відміну від виробництва шаруватих виливків із різнорідних матеріалів.

5. Використання легованих чавунів і вуглецевих сталей для виготовлення шаруватих виливків пов'язане з суттєвим ускладненням технологічного процесу їх виробництва внаслідок застосування трудомістких додаткових операцій, дорогого устаткування й підвищення, в зв'язку з цим, собівартості виливків такого класу.

6. Одним із перспективних технологічних заходів для виготовлення якісних шаруватих литих деталей є застосування технології внутрішньоформового модифікування, що дає змогу виготовляти виливки із різною структурою з використанням одного базового чавуну, незважаючи на те, що ця технологія чутлива до зміни параметрів технологічного процесу, які необхідно встановлювати окремо для кожної конкретної технологічної схеми виробництва виливків.

7. За правильного розроблення технологічних процесів внутрішньоформового модифікування можна виготовляти дрібні та середньої

маси шаруваті чавунні виливки з диференційованими структурою та властивостями в різних шарах. Такі литі деталі зможуть працювати тривалий час в умовах інтенсивного абразивного та ударно-абразивного зносу.

Мета дисертаційної роботи – розроблення технологічних процесів виробництва двошарових чавунних виливків з одного базового чавуну модифікованого в ливниковій системі ливарної форми.

Для досягнення зазначеної мети в дисертаційній роботі поставлені наступні задачі:

1. Теоретично обґрунтувати та вибрати хімічні склади базових чавунів, схильних до кристалізації за метастабільною та стабільною діаграмами для забезпечення заданих структури металу та його властивостей у виливках.

2. Обґрунтувати та вибрати ефективні графітизувальний і сфероїдизувальний модифікатори.

3. Виконати моделювання та дослідження технологічних варіантів виготовлення двошарових виливків для перевіряння можливості їхньої реалізації у виробничих умовах і встановлення практичної доцільності використання кожного з них.

4. Дослідити процеси кристалізації модифікованих чавунів у порожнині ливарної форми й установити закономірності структуроутворення та формування властивостей металу в двошарових виливках.

5. Розробити та впровадити у виробництво технологічні процеси виготовлення двошарових чавунних виливків з використанням внутрішньоформового модифікування базового розплаву, який виплавлено в одному плавильному агрегаті.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Шихтові матеріали і технологія виплавляння базових чавунів

Для виплавляння досліджуваних сплавів як основні шихтові матеріали використовували чавунний та сталевий брухт, переробний чавун та феросиліцій. Хімічний склад шихтових матеріалів наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Хімічний склад шихтових матеріалів

Матеріал	Вміст елемента, %					
	C	Si	Mn	P	S	Fe
Чавунний брухт	3,1-3,3	2,4-2,6	0,8-1,0	до 0,08	до 0,05	решта
Сталевий брухт	0,20-0,22	0,2-0,3	0,5-0,7	до 0,04	до 0,05	решта
Чавун переробний (ПЛ 2, ГОСТ 805-95)	4,3-4,6	0,5-0,6	0,1-0,2	до 0,3	до 0,01	решта
Феросиліцій (ФС 45, ДСТУ 4127-2002)	0,2-0,25	43-46	0,8-1,0	0,05	0,02	решта

Виплавляння проводили в індукційні печі марки ІСТ-006 підвищеної частоти з кислою футерівкою на основі діоскиду кремнію у набивному тиглі ємністю 60 кг

Для прискорення процесу плавлення розміри шматків шихти підбирали з урахуванням розмірів і місткості тигля та частоти струму, яким живиться піч. Оскільки частота струму машинного перетворювача дорівнювала 2500 Гц, то мінімальний розмір шматків шихти знаходився в межах 35-45 мм відповідно рекомендаціям, викладеним у роботі [101]. Такий підбір шихти дає можливість ущільнити її в тиглі, що прискорює процес плавлення й подовжує тривалість експлуатації футеровки печей.

Температуру розплаву перед випусканням контролювали вольфрам-ренієвою термопарою занурення ВР 5/20 з кварцовим наконечником і приладом РП-160-07 після обов'язкового вимикання печі.

Розрахунок шихти для виплавляння чавунів здійснювали за середньою межею вмісту хімічних елементів з урахуванням їх угару. У піч завантажували послідовно шматками феросиліцій, чавунний та сталевий брухт, переробний чавун.

Заливання форм здійснювали ковшами місткістю 5 та 10 кг.

2.2 Формувальні матеріали

Для отримання зразків виготовляли ливарні форми з єдиної формувальної суміші, склад якої за основними компонентами наведено в табл. 2.2.

Фізико-механічні властивості наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.2

Склад формувальної суміші для виготовлення ливарних форм

Найменування складових	Стандарт	Марка	Вміст у суміші, %
Оборотна суміш	—	—	88-90
Пісок кварцевий	ГОСТ 2138-91	2К ₁ О ₃ О ₂	8,0-6,5
Глина каолінова	ГОСТ 3226-93	П2	4,0-3,5

Таблиця 2.3

Фізико-механічні властивості формувальної суміші

Властивість суміші	Припустимі межі
Газопроникність, од	90-120
Міцність на стискання у сирому стані, МПа	0,04-0,06
Міцність на стискання у сухому стані, МПа	0,15-0,25
Вологість, %	5,0-7,0

З метою запобігання утворенню пригару на виливках до складу формувальної суміші додавали кам'яновугільний пил у кількості 3-4 %.

2.3 Виготовлення і заливання форм

Ливарні форми виготовляли у парних опоках за нерознімною моделлю. Після виготовлення форми просушували у сушильній шафі за температури 100-105°C протягом 4 годин.

З метою проведення внутрішньоформового модифікування у ливниковій системі передбачено використання кубічної реакційної камери розмірами 40×40×40 мм

Перед збиранням ливарної форми у реакційну камеру завантажували відповідний модифікатор. Центрування напівформ здійснювали за допомогою центрувального та напрямного штирів на заливальному плаці, після чого зібрані форми навантажували, а штирі вилучали.

Після заливання розплаву та його охолодження форми вибивали та вилучали зразки.

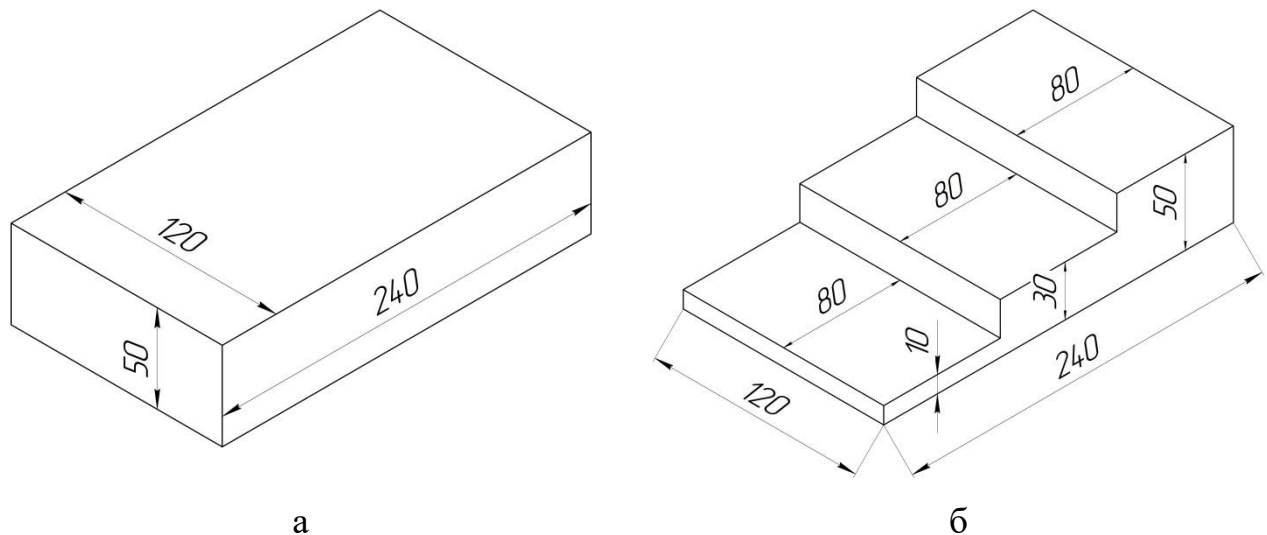
2.4 Зразки для досліджень

Для проведення досліджень використовували зразок «Брусок» та «Ступінчаста проба», конфігурацію та розміри яких зображено на рис. 2.1.

Для виявлення макроструктури на зразку «Брусок» виконували поперечний надріз по центру на 1/6 його ширини, а на зразку «Ступінчаста проба» – надрізи на всіх перерізах на 1/3 ширини, після чого виливки розбивали.

Вибрана форма зразків та їх розташування (рис. 2.1) дає можливість одержувати литі заготовки в нижній півформі в горизонтальному положенні, що забезпечує максимальну їх щільність та забезпечують відтворюваність результатів кожної серії досліджень.

Для мікроструктурних досліджень сплавів з кожної технологічної проби вирізали зразки, з яких виготовляли шліфи. Різання зразків абразивними кругами проводили на верстаті Delta AbrasiMet фірми Buehler, що давало можливість максимально зберегти структуру зразка.



а – «Брусок»; б – «Ступінчаста проба»

Рис. 2.1. Схеми зразків

Поверхню шліфів підготовлювали з допомогою автоматичного шліфувально-полірувального верстату підготовки проб марки Beta Grinder-Polisher фірми Buehler.

2.5 Дослідження структури та хімічного складу чавуну

Аналіз складових структури металічної матриці проводили на зразках експериментального виливка. Для травлення структури використовували 4 %-вий спиртовий розчин азотної кислоти.

Для визначення кількості структурних складових у чавунних зразках використовували точковий метод А.А. Глаголева, який полягає в тому, що в полі мікрошліфа розподіляють велику кількість точок, потім підраховують кількість точок, які попали на різні фази. Відносна кількість точок, які попали

на дану фазу від загальної їх кількості, пропорційна площі фази на шліфу. Кількість точок обчислювали в 10 полях зору.

Відносний об'єм, який займає дана фаза розраховували за формулою:

$$V = \frac{n}{N} \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

де n – кількість точок, які належать даній фазі;

N – спільна кількість точок.

Мікроструктуру отриманих сплавів та оцінку вкраплень графіту досліджували на оптичному мікроскопі МІМ-8 при збільшенні $\times 100$.

При оцінюванні вкраплень графіту визначали форму, розподіл, кількість та розмір графітових вкраплень і структурних складових металевої матриці за ГОСТ 3443-87.

Дослідження мікроструктури проводили на растровому електронному мікроскопі РЕМ 106І, на якому також досліджували локальний хімічний склад окремих фаз і розподіл хімічних елементів між ними методом мікрорентгеноспектрального аналізу.

Хімічний склад одержаних сплавів визначали стандартними методиками хімічного аналізу. Вміст окремих елементів визначали методом енергодисперсійного рентгенофлуоресцентного аналізу на приладі «EXPERT 3L». Дана установка дозволяє неруйнівним методом визначити масову частку основних хімічних елементів (від 12Mg до 92U), що входять до складу досліджуваного зразка.

Масову частку вуглецю визначали методом інфрачервоної спектроскопії ГОСТ 22536.1-88. Даний метод заснований на спалюванні наважки чавуну в у потоці кисню за температури 1350-1700 °С і визначенні кількості утвореного діоксиду вуглецю шляхом вимірювання поглинутої ним інфрачервоної радіації.

Вуглецевий еквівалент чавуну розраховували за формулою [62]:

$$C_e = C + 0,3 (Si + P), \quad (2.2)$$

де C_e – вуглецевий еквівалент чавуну, %

C – вміст вуглецю у чавуні, %;

Si – вміст кремнію у чавуні, %;

P – вміст фосфору у чавуні, %.

2.6 Дослідження механічних властивостей

Твердість зразків визначали за методом Брінелля, який регламентується державним стандартом ДСТУ ISO 6506-1:2007 на приладі типу ТШ-2М. Індентором слугувала кулька, діаметром 10 мм. Випробування проводили при навантаженні $F=29,42$ кН. Час витримання зразка під навантаженням – 10 с.

Число твердості за Брінеллем визначають за наступною формулою:

$$HBW = \frac{0,102 \cdot 2F}{\pi \cdot D^2 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}}\right)}, \quad (2.3)$$

де F – зусилля, що прикладене до індентора під час випробувань, Н;

D – діаметр кульки, мм;

d – середній діаметр відбитка, мм.

Мікротвердість зразків визначали за методом Віккерса, який регламентується державним стандартом ДСТУ ISO 6507-1:2007 на приладі типу ПМТ-3. Індентором слугувала алмазна правильна піраміда з квадратною основою, кут між протилежними гранями біля вершини якої складає 136° . Випробування проводили при навантаженні $F=1$ Н. Час витримки зразка під навантаженням – 10 с.

Число мікротвердості за Віккерсом визначають за наступною формулою:

$$HV = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2}, \quad (2.4)$$

де F – зусилля, що прикладене до індентора під час випробувань, Н;
 d – середнє арифметичне значення двох довжин діагоналей d_1 та d_2 , мм.

2.7 Моделювання процесів заливання та кристалізації

В роботі використовували моделювання процесів заливання та кристалізації чавуну. У САД-системі створено тривимірні моделі виливків з ливниковими системами та зовнішні холодильники. Проведено експорт у САМ-систему для подальшого моделювання процесів за різних умов. За даними робіт [102-106] результати моделювання у САМ-системах показують збіжність результатів із практичними даними.

Зафіксовані умови під час моделювання:

- матеріал форми: суха піщано-глиняста суміш (за температури 20 °С: ступінь чорноти – 0,93; теплопровідність – 0,9 Вт/(м·К); питома теплоємність – 550 Дж/(кг·К); густина – 1550 кг/м³);
- матеріал зовнішнього холодильника: сірий чавун (за температури 20 °С: ступінь чорноти – 0,93; теплопровідність – 50 Вт/(м·К); питома теплоємність – 500 Дж/(кг·К); густина – 7200 кг/м³);
- початкова температура ливарної форми: 20 °С.
- чавун, схильний до кристалізації за метастабільною діаграмою (за температури 1600 °С: теплопровідність – 200 Вт/(м·К); питома теплоємність – 950 Дж/(кг·К); густина – 6900 кг/м³);
- чавун, схильний до кристалізації за стабільною діаграмою (за температури 1600 °С: теплопровідність – 200 Вт/(м·К); питома теплоємність – 950 Дж/(кг·К); густина – 6600 кг/м³).

Під час моделювання змінювали температури заливання чавунів, геометричні розміри виливка та холодильника.

В результаті моделювання отримано кінетику заповнення чавуном ливарної форми та термографічні дані.

2.8 Визначення зносостійкості

Визначення абразивної зносостійкості проводили за методикою, описаною Заблоцьким В.К. та Дьяченко Ю.Г. [107]. Попередньо підготовлені зразки перерізом 15×15 мм фіксували в експериментальній установці та піддавали абразивному зношуванню їх торцеву частину під дією навантаження 0,44 Н/см². За абразивний матеріал використовували електрокорундове полотно. Розмір абразивних часточок становив 250 мкм. Полотно закріплювали на горизонтальному диску діаметром 200 мм, який обертався зі швидкістю 960 об/хв за допомогою електродвигуна.

Зразок в процесі випробувань в радіальному напрямку залишався нерухомим. Один цикл випробування тривав 15 хв., після чого виконували зміну абразиву, при цьому шлях, який дослідний зразок проходив за цей період, становив 9,04 км. Масу зразків визначали після кожного циклу випробувань шляхом зважування на аналітичних вагах з точністю до 0,001 г.

За критерій зносостійкості обрано відносне зношування зразків, яке визначали за формулою:

$$\varepsilon = \frac{m_0 - m_i}{m_0}, \quad (2.5)$$

де m_0 – маса зразка до випробування, г;

m_i – маса зразка після випробування через певний час, г.

Дослідження припиняли за умови, що відносне зношування впродовж останніх трьох циклів випробування не змінювалось.

2.9 Оброблення результатів експериментів

Достовірність результатів експериментів залежить від інструментальної і статистичної похибок. Статистичні похибки викликані неврахуванням всіх факторів впливу на структуру та властивості досліджуваних матеріалів.

Для проведення вимірювань властивостей сплавів використовували не менше 3-х зразків для кожної експериментальної точки. Математичне оброблення результатів експериментальних даних за обмеженої кількості спостережень здійснювали з використанням розподілу Стюдента за довірчої ймовірності 90% [108].

Побудову графічних залежностей здійснювали з урахуванням довірчих інтервалів середнього арифметичного.

Розмір довірчого інтервалу визначали за формулою:

$$\Delta Y = \frac{t \cdot S}{\sqrt{n}}, \quad (2.6)$$

де t – коефіцієнт Стюдента за даних n та α ;

S – оцінка середньоквадратичного відхилення результату окремого спостереження [109].

Оброблення результатів виконували згідно рекомендацій, викладених в роботі [110]. Приділено особливу увагу усуненню грубих і попередженню систематичних помилок у результатах, достатній кількості дослідів, правильній інтерпретації графічного зображення залежностей, перевірці відтворюваності результатів і найбільш показовому представленню залежностей у вигляді $y = f(x)$.

Побудовані рівняння регресії та усі їх коефіцієнти були перевірені на адекватність.

Відтворюваність експериментів визначали за розрахунковим значенням критерію Кохрена та його порівнянням із табличним значенням [108-111]:

$$G_p = \frac{(S_u^2)_{max}}{\sum S_u^2}, \quad (2.7)$$

де G_p – розрахункове значення критерію Кохрена;

S_u^2 – дисперсія;

u – число дослідів у плані експерименту.

Статистичну значущість коефіцієнтів регресії визначали, виходячи із розрахунку їх дисперсій і значень критеріїв Стюдента щодо кожного коефіцієнта [110]:

$$t_{pi} \geq t_T, \quad (2.8)$$

де t_T – табличне значення критерію Стюдента;

$i = 0, 1 \dots k$.

$$t_{pi} = \frac{|b_i|}{S_{\bar{y}} / \sqrt{N}}, \quad (2.9)$$

де b_i – коефіцієнт регресії;

$S_{\bar{y}}$ – загальна помилка експерименту;

N – кількість дослідів у плані експерименту.

Після встановлення значущих коефіцієнтів і виведення в остаточному вигляді рівняння регресії перевіряли гіпотезу щодо адекватності моделі, тобто здатності рівняння регресії передбачати відгук із задовільною точністю.

Перевірку здійснювали за допомогою критерію Фішера [108-111]:

$$F_{f_1, f_2}^{розрах} = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} \leq F_{f_1, f_2}^{табл} \quad (2.10)$$

При цьому дисперсію дослідів розраховували за формулою:

$$S_y^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^u (y_{ui} - \bar{y}_u)^2, \quad (2.11)$$

де m – кількість повторювань дослідів за однакових умов;

u – кількість дослідів у плані експерименту.

Дисперсія адекватності розрахована за формулою [108, 110]:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{u=1}^{N_k} (y_u^{розрах} - y_u^{експ})^2 - \sum_{u=1}^{n_0} (y_{ou} - \bar{y}_0)^2}{f_2}, \quad (2.12)$$

де f_2 – число ступенів свободи, яке визначається за формулою:

$$f_2 = N - k' - (n_0 - 1), \quad (2.13)$$

де k' – число статистично значущих коефіцієнтів у рівнянні регресії;

N – кількість дослідів у плані експерименту;

n_0 – кількість дослідів у центрі плану (на основному рівні).

Побудову графічних залежностей проводили на ПЕОМ, із використанням пакету прикладних програм: Microsoft Excel, Grapher 4.

Розрахунок номограм здійснювали програмою Surfer 6 із використанням поліному II-го порядку.

Висновки до розділу 2

1. Вибрано форму та розміри литих зразків для дослідження властивостей металу в чавунах шаруватих виливків і розроблено технології їх виготовлення.

2. Розроблено методику моделювання процесів структуроутворення під час внутрішньоформового модифікування чавуну, при цьому змінювали температури розплавів перед заливанням у форми, геометричні розміри виливків і холодильника, що дало змогу визначити кінетику заповнення чавуном ливарної форми та термографічні дані.

3. Визначено ефективні методи оброблення результатів досліджень.

4. Методичне забезпечення досліджень має високі відтворюваність і достовірність результатів й відповідає вимогам чинних нормативних документів.

РОЗДІЛ 3

ВИЗНАЧЕННЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ БАЗОВИХ ЧАВУНІВ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ ПРОЦЕСУ МОДИФІКУВАННЯ

3.1 Встановлення впливу вуглецю та кремнію на кристалізацію базових чавунів

Відомо [2], що високу твердість сплаву й зносостійкість деталей на його основі можна забезпечити чавуном, в структурі якого містяться карбіди заліза.

У дисертаційній роботі досліджено технологічні варіанти одержання чавунних виливків з різною структурою. Сутність першого варіанту полягає у послідовному заливанні ливарної форми окремими порціями чавуну через дві незалежні ливникові системи чавуном, схильним до кристалізації за метастабільною діаграмою, з витримкою між етапами заливання. Перша порція чавуну через ливникову систему безпосередньо потрапляє у порожнину ливарної форми, а друга – проходить внутрішньоформове модифікування та дозаповнює ливарну форму. Таким чином у виливку забезпечується диференціація структури та властивостей.

Основними умовами проведення експериментів є заливання рідкого чавуну у форми із сухої піщано-глинястої суміші та отримання виливків із товщиною перерізу стінки до 50 мм. При цьому необхідно підібрати такий хімічний склад чавуну, кристалізація якого проходить за метастабільною діаграмою стану.

Для визначення хімічного складу базового чавуну в експериментах використовували виливок ступінчастої проби з перерізами стінок 10, 20, 30, 40 та 50 мм. Температура заливання у сухі піщано-глинясті форми становила $t_{\text{зал}} = 1300 \pm 10$ °С.

Відомо, що найбільший вплив на умови кристалізації чавуну здійснюють вуглець та кремній. Для забезпечення умов кристалізації базового чавуну за метастабільною діаграмою з вибіленням вміст вуглецю і кремнію у рідкому

сплавi витримували в рекомендованому ГОСТ 1215-79 для ковкого чавуну діапазоні: 2,4-2,9 % С і 1,0-1,6 % Si. Вміст решти компонентів чавуну фіксували у такому діапазоні: 0,4-0,6 % Mn; до 0,12 % P; до 0,02 % S; решта Fe.

Експериментально визначено, що у перерізах ступінчастої проби товщиною 30, 40 та 50 мм отримано чавун зі структурою, характерною для сірого або половинчастого із вкраплинами як пластинчастого графіту, так і структурно вільного цементиту.

Для забезпечення кристалізації чавуну за метастабільною діаграмою змінювали вміст вуглецю в межах від 3,0 до 2,3 % додаванням сталевого брухту, а вміст кремнію – від 0,45 до 1,8 %, використанням феросиліцію ФС75 лігатури. При цьому вуглецевий еквівалент сплаву змінювався у межах від 2,4 до 3,6 %.

Встановлено, що при зміні вмісту кремнію у чавуні в межах від 0,45 до 1,8 % структура чавунного зразка з товщиною перерізу стінки 50 мм змінюється від структури доєвтектичного білого чавуну із цементитними вкраплинами у перлітно-феритній металевій матриці до сірого із вкраплинами графіту пластинчастої форми у тій же металевій матриці (рис. 3.1).

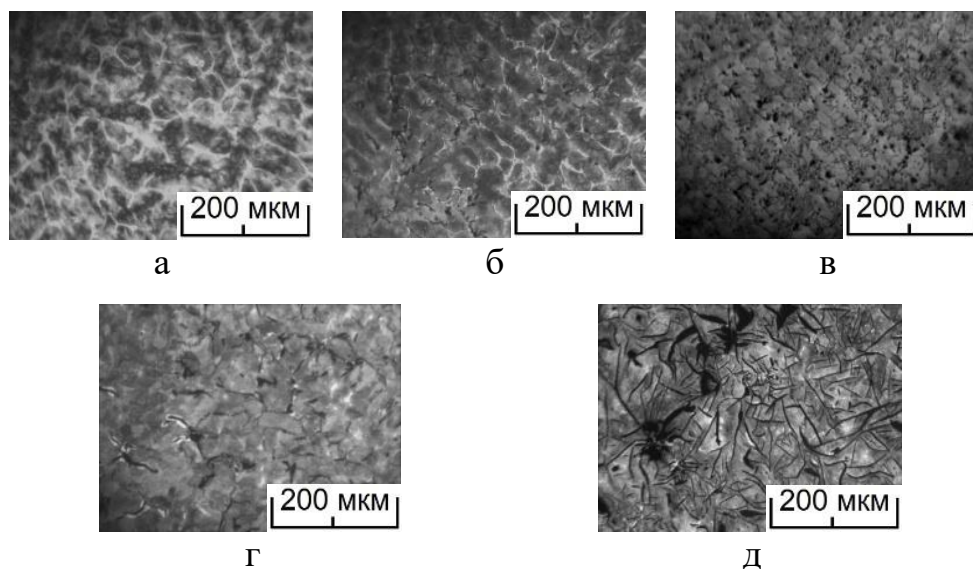


Рис. 3.1. Вплив кремнію на мікроструктуру білого чавуну із вмістом вуглецю 2,8-3,0 %: а – 0,45 % Si, б – 0,60 % Si, в – 1,0 % Si, г – 1,4 % Si, д – 1,8 % Si

У свою чергу твердість чавунних зразків ступінчастої проби плавно знижується від 450 до 200 HB зі збільшенням товщини перерізу стінки від 10 до 50 мм та збільшенням вмісту кремнію у досліджуваному діапазоні (рис. 3.2).

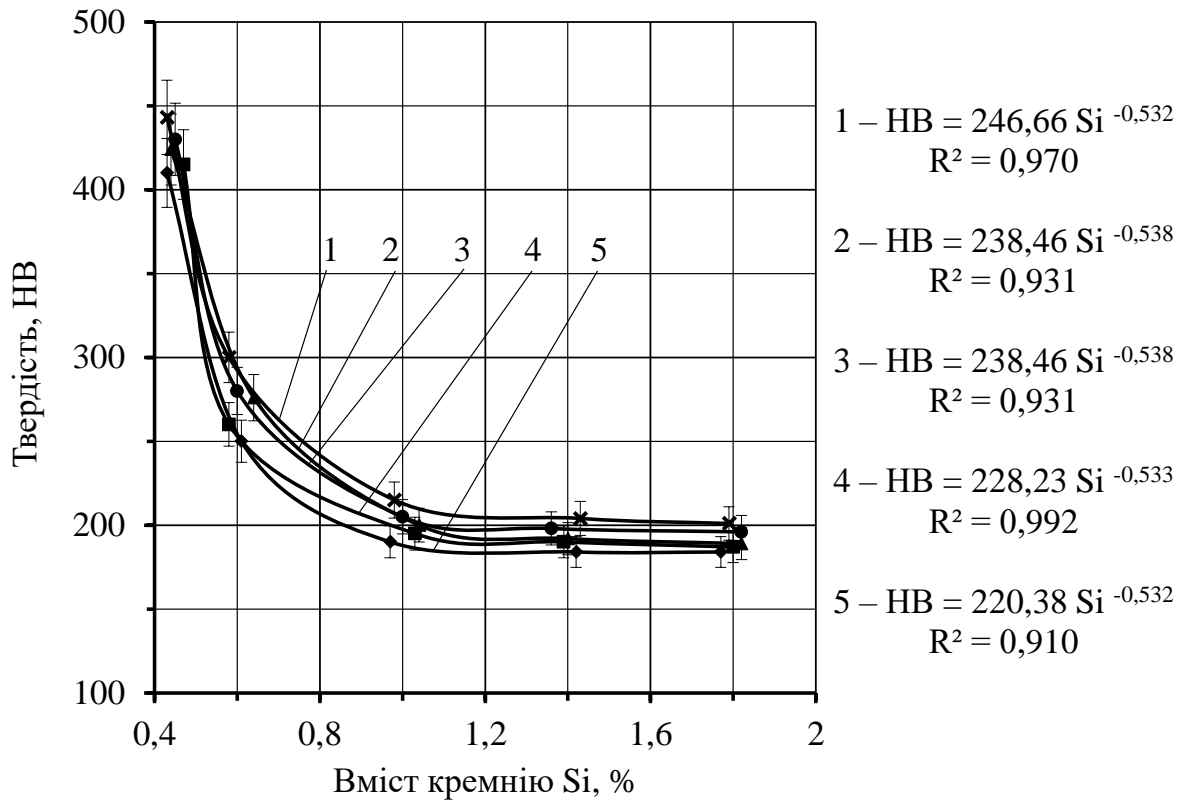


Рис. 3.2. Вплив кремнію на твердість базового чавуну, який містить вуглецю 2,85-3,00 % в перерізах зразків ступінчастої проби: 1 – 10 мм, 2 – 20 мм, 3 – 30 мм, 4 – 40 мм, 5 – 50 мм

При цьому зміна вмісту вуглецю у досліджуваному діапазоні впливає на кількість карбідів у вигляді структурновільного цементиту та ледебуритної евтектики. Збільшення вмісту вуглецю у чавуні призвело до збільшення у його структурі кількості карбідів (рис. 3.3) та, як наслідок, підвищенню твердості зразків (рис. 3.4).

Отримані результати узгоджуються із відомими уявленнями про вплив вуглецю та кремнію на кристалізацію та структуроутворення чавуну [59-62].

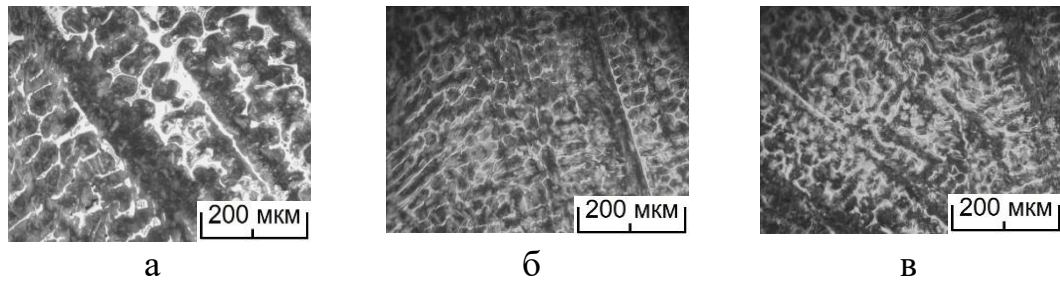


Рис. 3.3. Мікроструктура чавунної проби перерізом 50 мм, яка містить 0,45 % кремнію та вуглецю: а – 2,30 %, б – 2,85 %, в – 3,00 %

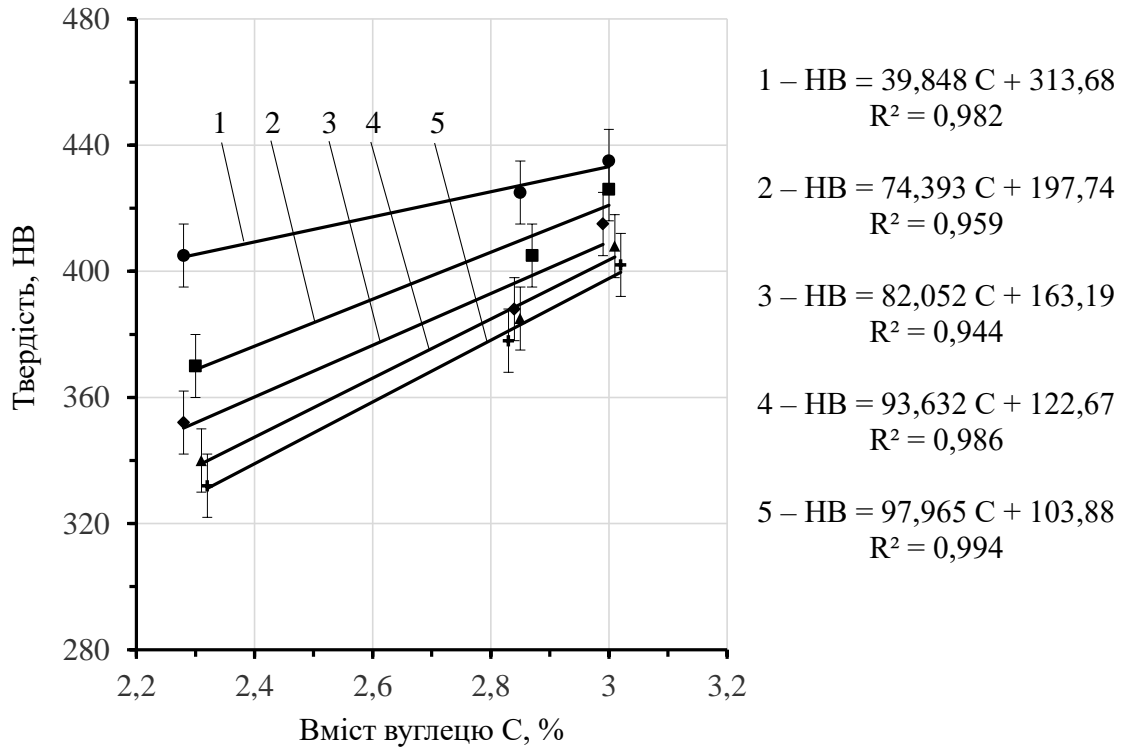


Рис. 3.4. Вплив вуглецю на твердість білого чавуну, який містить 0,45 % Si в перерізах зразків ступінчастої проби: 1 – 10 мм, 2 – 20 мм, 3 – 30 мм, 4 – 40 мм, 5 – 50 мм

Для реалізації другого технологічного варіанту виробництва двошарових виливків необхідно встановити такий хімічний склад чавуну, який би забезпечив кристалізацію чавунних зразків із товщиною перерізу стінок від 10 до 50 мм за стабільною діаграмою. Сутність технології полягає у тому, що ливарну форму заливають базовим розплавом чавуну із застосуванням внутрішньоформового модифікування. Після модифікування рідкий чавун заповнює робочу порожнину ливарної форми, в яку попередньо встановлено

зовнішній чавунний холодильник, що забезпечує прискорене тепловідведення від частини виливка, на поверхні якої формується зносостійкий шар білого чавуну.

Для забезпечення умов кристалізації базового чавуну за стабільною діаграмою стану обрано чавун з хімічним складом, близьким до евтектичного із вмістом вуглецю 3,4-3,6 % та кремнію 2,2-2,4 %.

Встановлено, що кристалізація чавуну обраного хімічного складу пройшла за стабільною діаграмою з графітизацією в усіх, і навіть у тонкому (рис. 3.5), перерізах зразків ступінчастої проби.

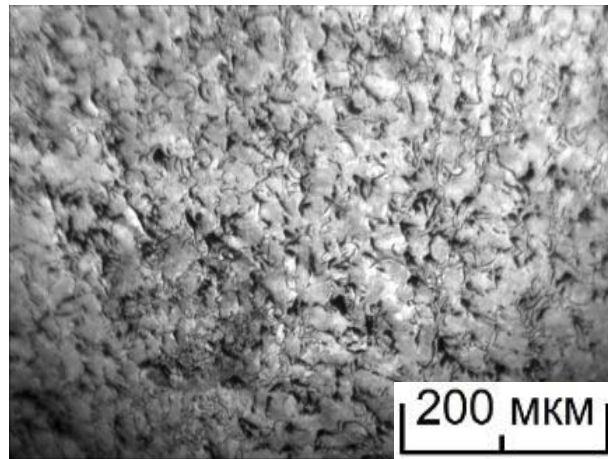


Рис. 3.5. Мікроструктура чавуну, який містить 3,4-3,6 % вуглецю та 2,2-2,4 % кремнію у перерізі зразка ступінчастої проби товщиною 10 мм

За результатами дослідження впливу вуглецю та кремнію на структуроутворення у чавунних виливках з різною товщиною перерізу для подальших досліджень рекомендовані наступні хімічні складі чавунів:

– схильного до кристалізації за метастабільною діаграмою: 2,8-3,0 % C; 0,45-0,50 % Si; 0,4-0,6 % Mn; до 0,12 % P; до 0,02 % S; решта Fe. Вуглецевий еквівалент $C_e = 2,94-3,15$ %;

– схильного до кристалізації за стабільною діаграмою: 3,4-3,6 % C; 2,2-2,4 % Si; 0,4-0,6 % Mn; до 0,12 % P; до 0,02 % S; решта Fe. Вуглецевий еквівалент $C_e = 4,13-4,4$ %.

3.2 Графітизувальне та сфероїдизувальне модифікування чавуну

Аналізом літературних джерел [59-62], встановлено, що для виробництва чавунних виливків з сірого чавуну з пластинчастим графітом, чавуну з вермикулярною формою графіту, високоміцного чавуну з кулястим графітом промисловістю використовуються технології модифікування. Ці технології дозволяють спрямовувати кристалізацію чавуну необхідним чином для утворення заданої структури у виливку, з метою використання, для виробництва двошарових чавунних виливків із різною структурою. Умови кристалізації чавуну впливають на морфологію графітових краплин, так і на структуру металевої матриці.

Для зміни умов кристалізації розплаву чавуну та забезпечення утворення у виливку необхідної структури в роботі використовували технологію модифікування рідкого чавуну [66, 77].

Для проведення графітизувального модифікування, яке використовують в основному для запобігання вибілення у виливках, у промисловості України застосовують модифікатори на основі кремнію.

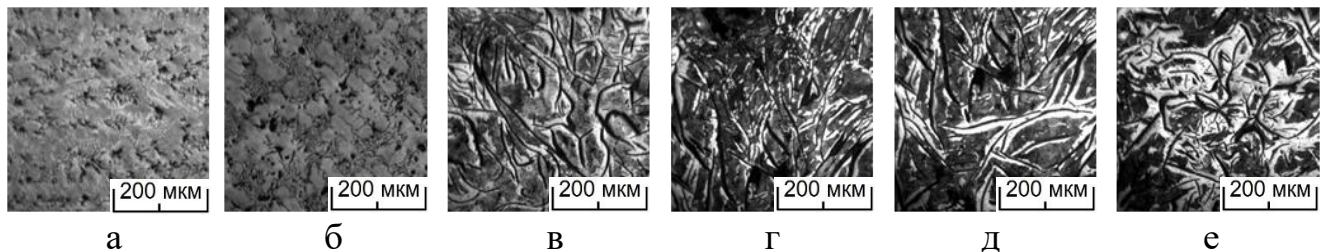
З аналізу літературних даних [67, 71, 72, 80, 92, 112] встановлено, що для графітизувального оброблення чавуну найпоширенішим модифікатором є феросиліцій марки ФС75. Для сфероїдизувального модифікування базового чавуну використовують комплексні феросиліціймагнієві лігатури [78, 81, 83]. У зв'язку з цим, для проведення експериментів було обрано модифікатор ФСМг7.

Для обраних умов експерименту, використовуючи дані робіт [81-84], з точки зору розчинення та подальшого засвоєння модифікаторів потоком рідкого чавуну за використання технології внутрішньоформового модифікування, розмір фракції обох модифікаторів складав 1-5 мм. Технологія уведення модифікатора описана в п. 2.3.

Оброблення рідкого чавуну здійснювали двома способами, а саме: у відкритому ковші та методом внутрішньоформового модифікування чавуну з

вмістом вуглецю 2,8-3,0 % та кремнію – 0,45-0,5 %. Температура розплаву під час модифікування становила 1450 ± 20 °С.

За результатами металографічного аналізу встановлено, що після оброблення графітизувальним модифікатором у ковші та заливання ливарної форми мікроструктура проби товщиною перерізу 5 мм характерна для половинчастого чавуну. Макроструктури зламів зразків ступінчастої проби з товщиною перерізу від 10 до 50 мм відповідали темно-сірому кольору, що характерно для сірого чавуну. При цьому у зразку з товщиною перерізу 5 мм формується мікроструктура з вкрапинами графіту та цементиту в перлітній металевій матриці (рис. 3.6, а), а у зразку з товщиною перерізу 10 мм – мікроструктура з вкрапинами графіту в перлітній металевій матриці, при цьому структурно вільний цементит зникає (рис. 3.6, б). Зі збільшенням товщини перерізу зразків ступінчастої проби спостерігалось зростання лінійних розмірів графітових вкраплин пластинчастої форми (рис. 3.7), а також збільшення частки фериту та зменшення частки перліту в металевій матриці (рис. 3.8).



а – 5 мм, б – 10 мм, в – 20 мм, г – 30 мм, д – 40 мм, е – 50 мм

Рис. 3.6. Мікроструктура чавуну після ковшового графітизувального модифікування у перерізах зразків ступінчастої проби з різною товщиною перерізу

За результатами внутрішньоформового графітизувального модифікування встановлено, що у всіх перерізах ступінчастої чавунної проби кристалізація відбулася за стабільною діаграмою з характерною темно-сірою макроструктурою зламу. Це пояснюється мінімальним часом витримання між проведенням модифікування чавуну та його кристалізацією у ливарній формі.

При цьому у мікроструктурі зразків усіх перерізів ступінчастої проби відсутній структурно вільний цементит і спостерігаються вкраплини пластинчастого графіту у феритно-перлітній матриці (рис. 3.9). Крім того, збільшення товщини перерізу зрізків ступінчастої проби від 10 до 50 мм призводить до зростання довжини пластинчастого графіту (рис. 3.10) та зменшення частки перліту в металевій матриці (рис. 3.11).



Рис. 3.7 Залежність розміру

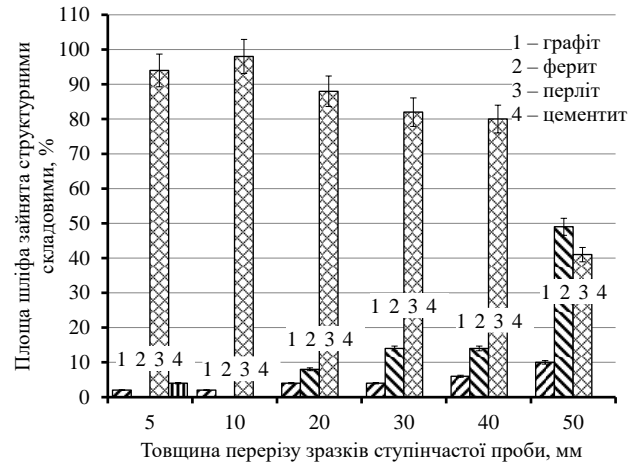
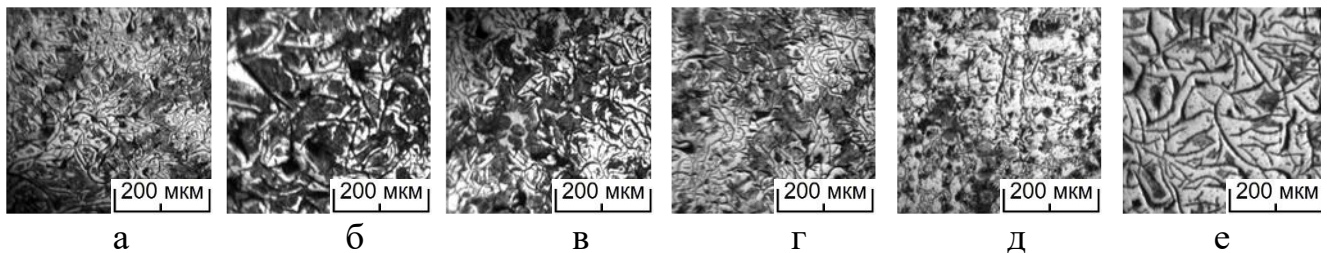


Рис. 3.8 Вміст структурних

графітових вкраплин у складових у перерізах зразків ступінчастої мікроструктурі від товщини проби після ковшового графітизувального перерізу зразків ступінчастої проби модифікування після ковшового графітизувального модифікування



а – 5 мм, б – 10 мм, в – 20 мм, г – 30 мм, д – 40 мм, е – 50 мм

Рис. 3.9 Мікроструктура чавуну після внутрішньоформового графітизувального модифікування у перерізах зразків ступінчастої проби з різною товщиною перерізу

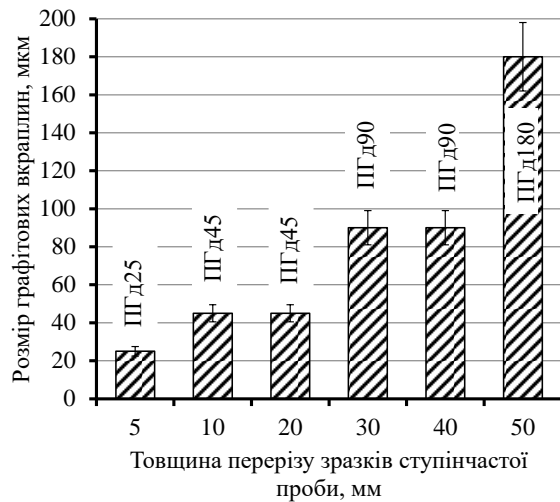


Рис. 3.10 Залежність розміру

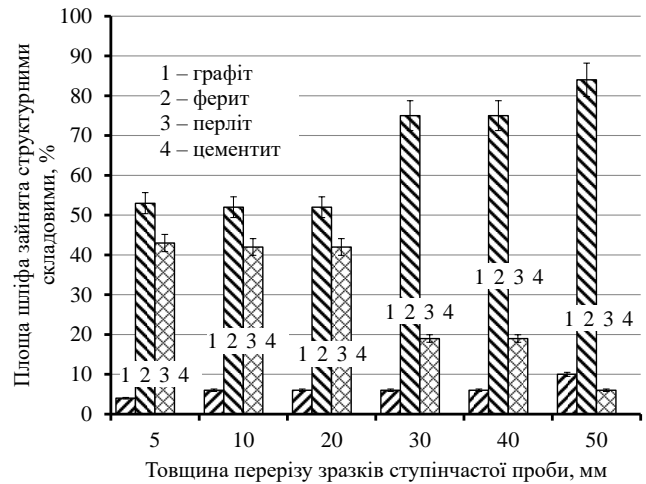


Рис. 3.11 Вміст структурних

графітових вкраплин у складових у перерізах зразків мікроструктурі від товщини ступінчастої проби після перерізу зразків ступінчастої проби внутрішньоформового графітизувального після внутрішньоформового модифікування графітизувального модифікування

Твердість зразків ступінчастої проби зі збільшенням товщини їх перерізу після ковшового графітизувального модифікування зменшується від 410 до 193 НВ (рис. 3.12, крива 1). Після внутрішньоформового графітизувального модифікування твердість зразків ступінчастої проби зменшується від 250 до 170 НВ зі збільшення товщини перерізу від 5 до 50 мм (рис. 3.12, крива 2).

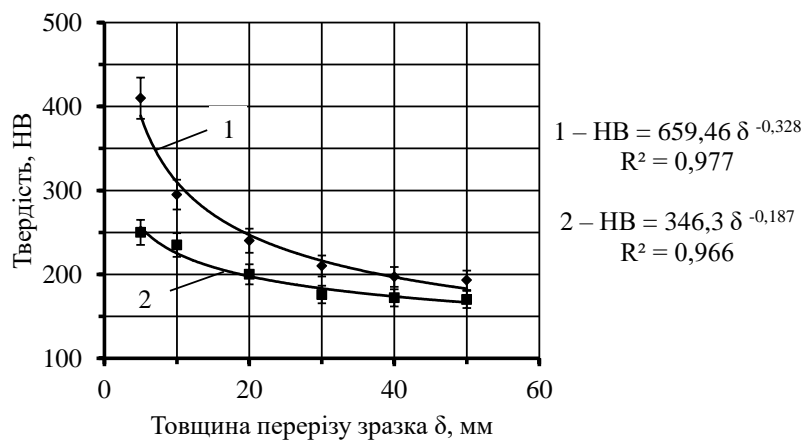
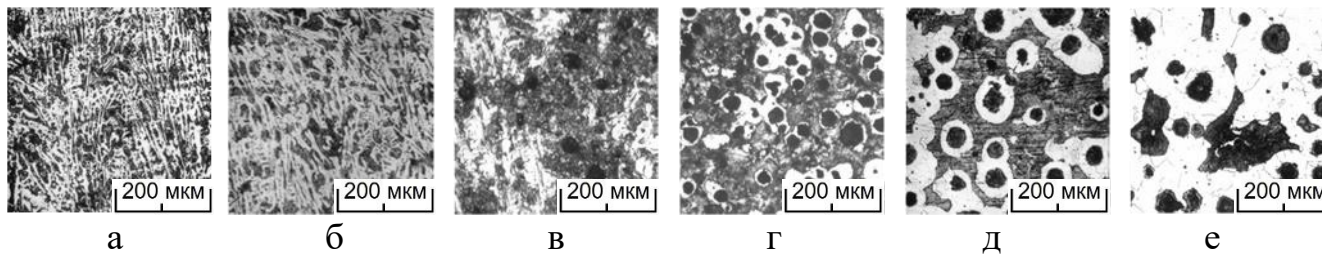


Рис. 3.12. Зміна твердості чавуну у перерізах ступінчастої проби після ковшового (1) та внутрішньоформового (2) графітизувального модифікування

Дослідження сфероїдизувального модифікування у відкритому ковші показали, що макроструктура у зразках ступінчастої проби товщиною перерізу 5, 10 та 20 мм характерна для половинчастого чавуну, а у перерізах від 30 до 50 мм спостерігається макроструктура світло-сірого кольору, що характерно для високоміцного чавуну з кулястим графітом. У мікроструктурі зразків ступінчастої проби з товщиною перерізу 5, 10 та 20 мм виявлено вкраплини дрібнодисперсного графіту кулястої форми та структурно вільного цементиту в перлітній металевій матриці (рис. 3.13, а, б, в). Подальше збільшення товщини перерізу зразків від 30 до 50 мм сприяє зникненню структурно вільного цементиту (рис. 3.13, г, д, е).



а – 5 мм, б – 10 мм, в – 20 мм, г – 30 мм, д – 40 мм, е – 50 мм

Рис. 3.13. Мікроструктура чавуну після ковшового сфероїдизувального модифікування у зразках ступінчастої проби з різною товщиною перерізу

Зі збільшенням товщини перерізу зразків від 5 до 50 мм збільшується діаметр вкраплин кулястого графіту (рис. 3.14), а, починаючи з перерізу 30 мм, у мікроструктурі чавуну з'являється феритна складова, кількість якої збільшується зі збільшенням його товщини (рис. 3.15).

В результаті внутрішньоформового сфероїдизувального модифікування макроструктура всіх зразків має світло-сірий колір, що характерно для високоміцного чавуну з кулястим графітом. При цьому у мікроструктурах відсутній структурно вільний цементит (рис. 3.16). Мікроструктура перерізу проби товщиною 5 мм складається з дрібнодисперсних вкраплин кулястого графіту в перлітно-феритній матриці. Зі збільшенням товщини перерізу зразка

від 5 до 50 мм збільшується діаметр вкраплин кулястого графіту (рис. 3.17) та кількість феритної складової у металевій матриці (рис. 3.18).

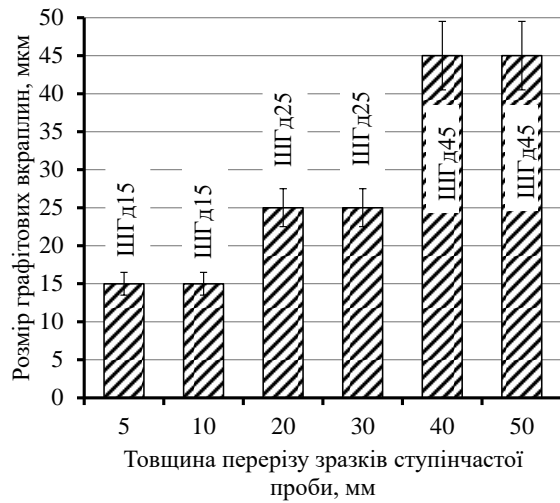


Рис. 3.14. Залежність діаметру

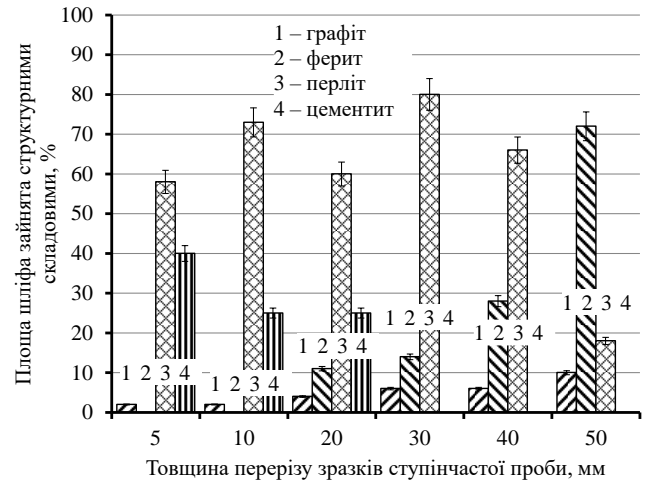
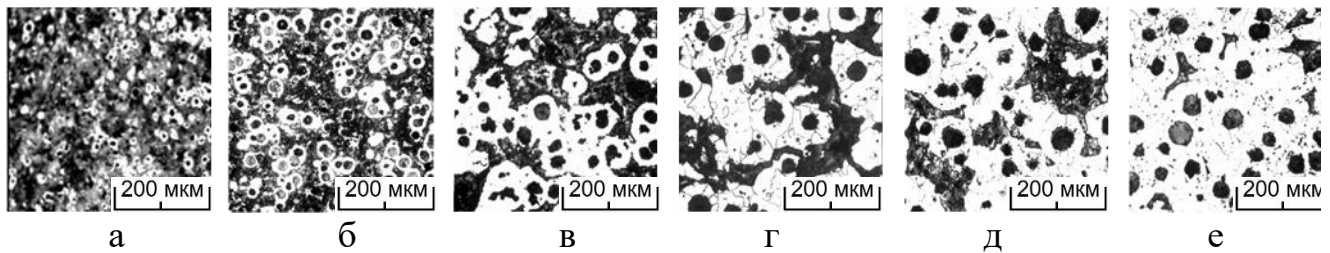


Рис. 3.15. Вміст структурних

графітових вкраплин у складових у перерізах зразків мікроструктурі від товщини ступінчастої проби після ковшового перерізу зразків ступінчастої проби сфероїдизувального модифікування після ковшового сфероїдизувального модифікування



а – 5 мм, б – 10 мм, в – 20 мм, г – 30 мм, д – 40 мм, е – 50 мм

Рис. 3.16. Мікроструктура чавуну після внутрішньоформового сфероїдизувального модифікування у зразках ступінчастої проби з різною товщиною перерізу

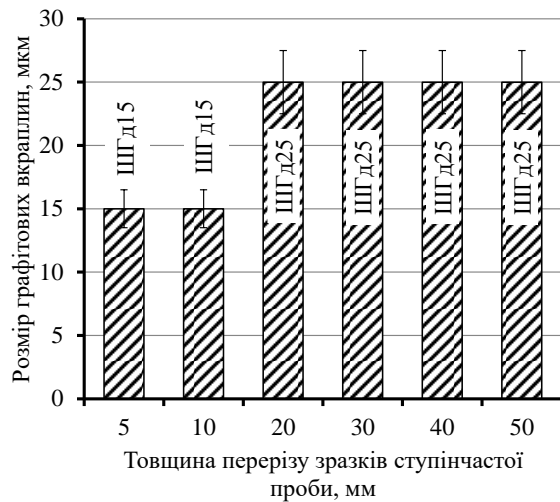


Рис. 3.17. Залежність діаметру графітових вкраплин у мікроструктурі від товщини перерізу зразків ступінчастої проби після внутрішньоформового сфероїдизувального модифікування

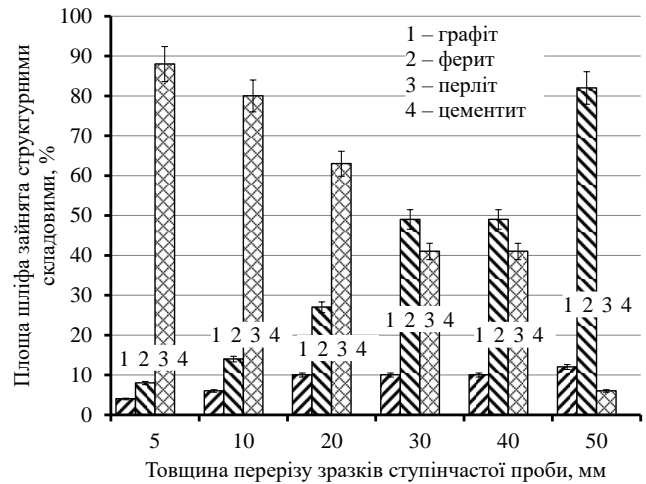


Рис. 3.18. Вміст структурних складових у перерізах зразків ступінчастої проби після внутрішньоформового сфероїдизувального модифікування

Твердість зразка зі збільшенням товщини його перерізу після ковшового сфероїдизувального модифікування зменшується від 450 до 230 НВ, що підтверджує наявність твердих вкраплин структурно вільного цементиту у перерізах товщиною 5, 10 та 20 мм. Але, після внутрішньоформового сфероїдизувального модифікування твердість у перерізах проби зменшується від 300 до 210 НВ зі збільшення товщини перерізу від 5 до 50 мм (рис. 3.19).

Таким чином показано, що при однаковому хімічному складі вихідних чавунів в литому стані спостерігаються суттєві відмінності у мікроструктурі, а, як наслідок, і у механічних властивостях перерізів ступінчастих проб, особливо у перерізах товщиною 5, 10 та 20 мм. Проведені дослідження підтверджують, що внутрішньоформове модифікування забезпечує стабільну кристалізацію чавунних зразків без вибілення у тонких перерізах, на відміну від ковшового модифікування.

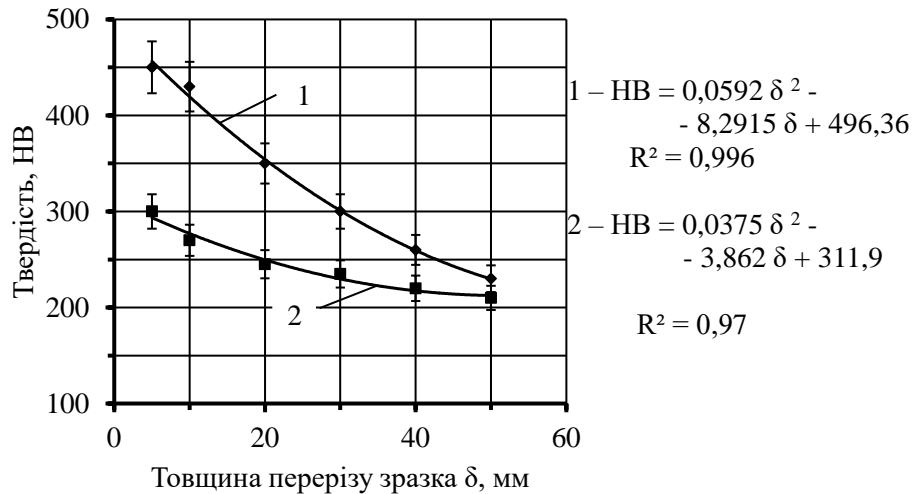


Рис. 3.19. Зміна твердості чавуну у перерізах ступінчастої проби після ковшового (1) та внутрішньоформового (2) сфероїдизувального модифікування

Висновки до розділу 3

1. За результатами дослідження впливу вуглецю та кремнію на структуроутворення в чавунних виливках з різною товщиною їх перерізів для подальших досліджень визначено такі чавуни: схильний до кристалізації за метастабільною діаграмою хімічного складу, мас. %: C = 2,8-3,0; Si = 0,45-0,50; Mn = 0,4-0,6; P – до 0,12; S – до 0,02; решта залізо (вуглецевий еквівалент $C_e = 2,94-3,15$ %) й схильний до кристалізації за стабільною діаграмою хімічного складу, мас. %: C = 3,4-3,6; Si = 2,2-2,4; Mn = 0,4-0,6; P – до 0,12; S – до 0,02; решта залізо (вуглецевий еквівалент $C_e = 4,13-4,4$ %).

2. Для графітизувального внутрішньоформового модифікування вибрано феросиліцій марки ФС75 з розмірами фракцій 1-5 мм та кількістю 2 % від маси рідкого чавуну, а для сфероїдизувального внутрішньоформового модифікування визначено феросилікомагнієвий модифікатор марки ФСМг7 таких же фракцій і кількості.

3. Металографічним аналізом встановлено, що після оброблення графітизувальним модифікатором у ковші перед безпосереднім заливанням ливарної форми мікроструктура проби товщиною перерізу 5 мм характерна для

половинчастого чавуну з вкрапленнями графіту та цементиту в перлітній металевій матриці. а макроструктури зламів зразків ступінчастої проби з перерізами від 10 до 50 мм мають темно-сірий колір, притаманний для сірого чавуну з вкрапленнями графіту в перлітній металевій матриці без структурно вільного цементиту.

4. Із збільшенням товщини перерізу зразків ступінчастої проби в металі зростають лінійні розміри графітових вкраплень пластинчастої форми, збільшується частка фериту й зменшується частка перліту в металевій матриці.

5. Доказано, що за однакового хімічного складу вихідних чавунів у литому стані мають місце суттєві відмінності в мікроструктурі, що змінює механічні властивості металу в перерізах ступінчастих проб, особливо в перерізах товщиною 5, 10 і 20 мм.

6. Установлено, що внутрішньоформове модифікування чавуну забезпечує стабільну кристалізацію металу у виливках без вибілення в тонких перерізах на відміну від ковшового модифікування.

РОЗДІЛ 4

ПРОЦЕСИ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ У ДВОШАРОВИХ ЧАВУННИХ ВИЛИВКАХ

4.1 Диференціація структури чавунного виливка за технологією виготовлення поетапним заливанням форми

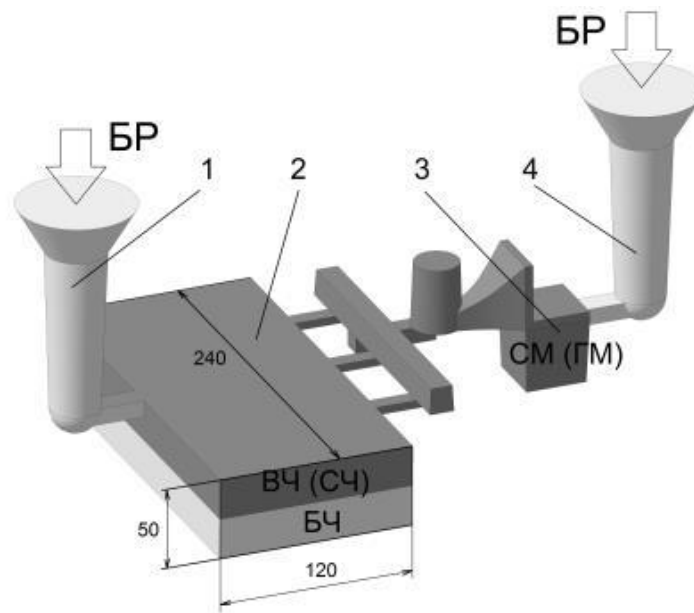
З аналізу літературних джерел, поширеним методом виготовлення двошарових виливків є поетапне заливанням форми.

На основі методу отримання двошарових виливків поетапним заливанням розплавів у форму через автономні ливникові системи дослідниками [113-115] був розроблений і запропонований метод отримання чавунних виливків з розплаву чавуну одного хімічного складу модифікуванням його в ливарній формі. Даний метод дозволяє отримувати зносостійкі чавунні виливки з робочим шаром із білого чавуну з карбідними включеннями. Сутність процесу полягає в поетапному заливанні ливарної форми чавуном одного хімічного складу через незалежні ливникові системи, при цьому одна з них дозволяє здійснювати внутрішньоформове модифікування, що дозволяє забезпечити диференціацію властивостей у виливку [116, 117].

Одним із завдань є встановлення технологічних параметрів процесу одержання двошарових чавунних виливків із диференційованими властивостями для роботи в умовах зношування. Кристалізацію першої порції розплаву необхідно провести за метастабільною діаграмою стану, що дозволить сформувати робочий зносостійкий шар виливка. У другому шарі виливка необхідно забезпечити отримання графітизованого чавуну, що забезпечує можливість роботи виливка у зазначених умовах. Для забезпечення заданих властивостей виливків необхідно провести внутрішньоформове модифікування розплаву графітизувальним або сфероїдизувальним модифікаторами. Основними умовами отримання таких виливків є забезпечення неможливості

перемішування чавунів після другого етапу заливання і забезпечення бездефектності перехідного шару.

Дослідження проводили з використанням виливків у вигляді бруска з розмірами $240 \times 120 \times 50$ мм. Підведення розплаву в порожнину форми здійснювали через дві незалежні ливникові системи (рис. 4.1).



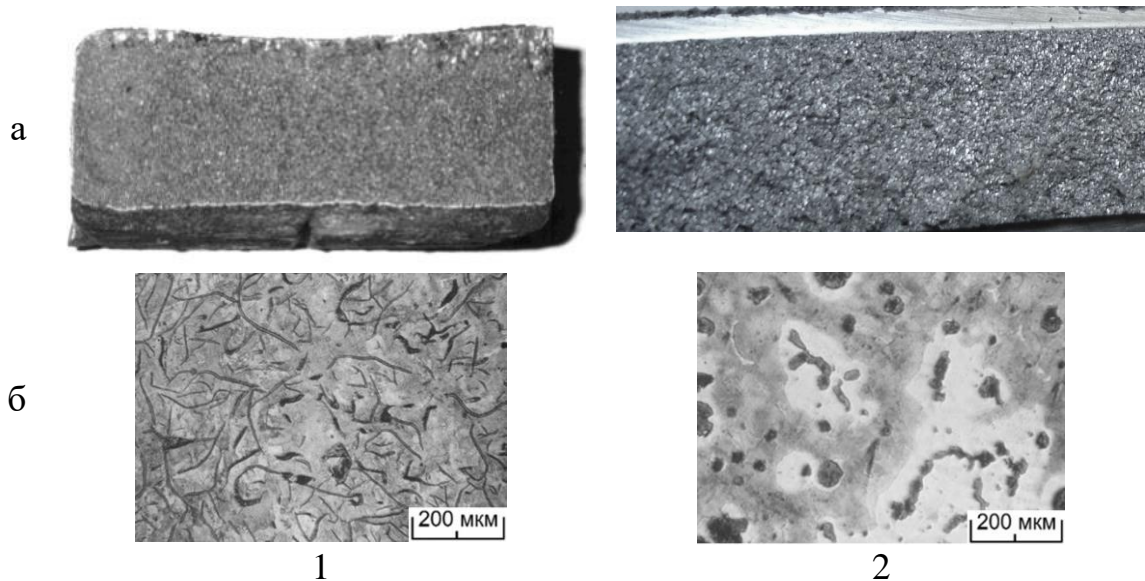
1 – перша ливникова система; 2 – виливок; 3 – реакційна камера в другій ливниковій системі; 4 – друга ливникова система

Рис. 4.1. Схема виливка з ливниковими системами

Експрес-оцінювання результатів експерименту проводили візуальним методом за макроструктурою зламу у верхній і нижній частині чавунного виливка в його центральному перерізі. Оцінювання структури здійснювали металографічним аналізом.

Авторами роботи [58] відзначається, що при отриманні двошарового виливка за наведеною вище технологією доливання другої порції металу відбувається в той час, коли поверхня першого шару знаходиться в рідкому або рідко-твердому стані, тобто інтервал між послідовними заливаннями зводиться до мінімуму.

За результатами досліджень встановлено, що при мінімальному витримуванні (2-3 с) між етапами заливання розплаву диференціація структури у виливку не спостерігається, а виливок кристалізується з однорідною структурою сірого чавуну з пластинчастим або вермикулярним графітом, залежно від виду модифікування (рис. 4.2), що підтверджується й моделюванням цього процесу (рис. 4.3).



1 – після графітизувального модифікування; 2 – після сфероїдизувального модифікування

Рис. 4.2. Макроструктура зламу (а) та мікроструктура (б) виливка виготовленого із часом витримування між етапами заливання 2-3 с

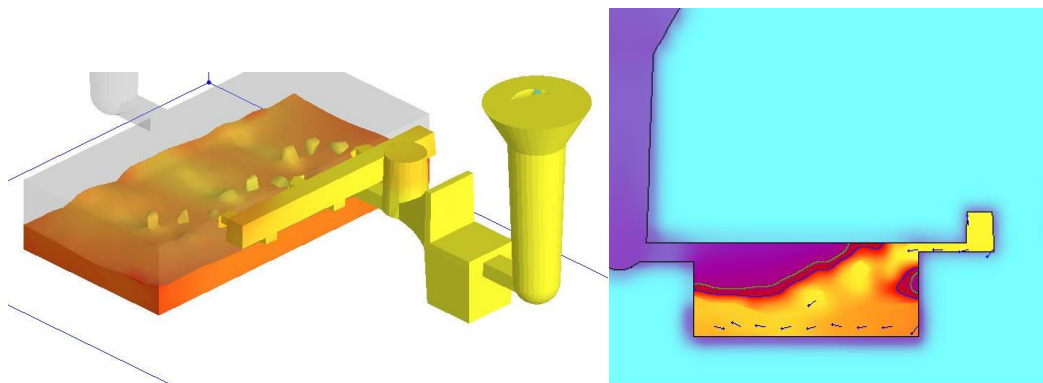


Рис. 4.3. Моделювання заливання двошарового виливка із часом витримування між етапами заливання 2-3 с

У даному випадку це пояснюється тим, що чавун кристалізується без вибілення з рівномірним за висотою перерізу дисперснокристалічним сірим зламом з графітом переважно дрібно-пластинчастої форми у перлітно-феритній металевій матриці внаслідок гідродинамічного перемішування. Зміна структури призвела до зниження твердості базових поверхонь виливка у порівнянні з контрольними виливками з вихідного чавуну з 410-450 до 145-200 НВ.

Встановлено, що різниця вмісту кремнію у верхній та нижній частинах перерізу стінки виливка не перевищувала стандартної похибки хімічного аналізу. Отже, за час охолодження від температури заливання до повного об'ємного твердіння металу кремній, який на другому етапі заливання із модифікатора переходить у верхні шари виливка, встигає розчинитися або продифундувати у нижній шар виливка. Засвоєний з модифікатору кремній сприяє графітизації чавуну за всім об'ємом металу у ливарній формі.

Дослідженнями не вдалося відтворити технологію, описану в роботі [58]. Для визначення технологічних параметрів процесу в заданих умовах експерименту застосували метод САМ моделювання.

4.1.1 Моделювання процесу поетапного заливання

Для визначення часового інтервалу витримування між послідовними заливаннями розплаву застосовували моделювання. Для дослідження побудовано 3D-моделі довжиною та шириною 100×100 мм (рис. 4.4). Висоту моделей варіювали в діапазоні від 5 до 50 мм з кроком у 5 мм, що імітує товщини стінок дрібних чавунних виливків, що використовують у промисловості. У центрі мас кожної моделі було встановлено датчик, який у режимі реального часу фіксував значення температури модельованого розплаву. Для набору додаткових даних за часом кристалізації, температури заливання розплаву для проведення моделювання змінювали від $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ з кроком $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

За результатами проведеного моделювання отримано криві охолодження розплаву в центрі мас кожної з моделей. Після математичного оброблення отриманих даних були побудовані залежності часу кристалізації розплаву від товщини стінки моделей за різних температур заливання (рис. 4.5).

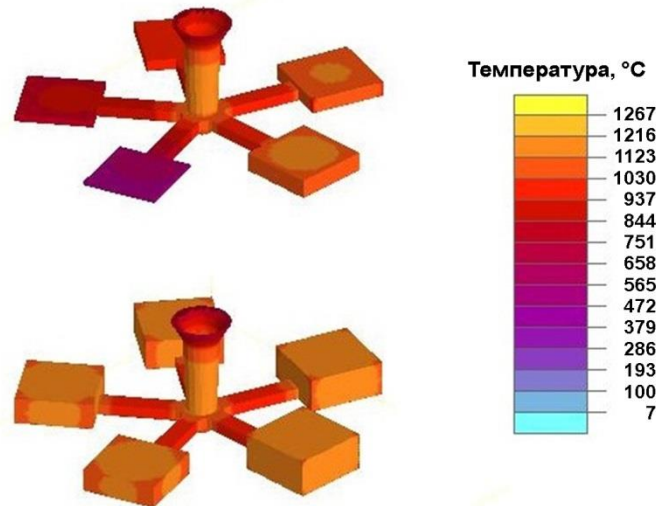
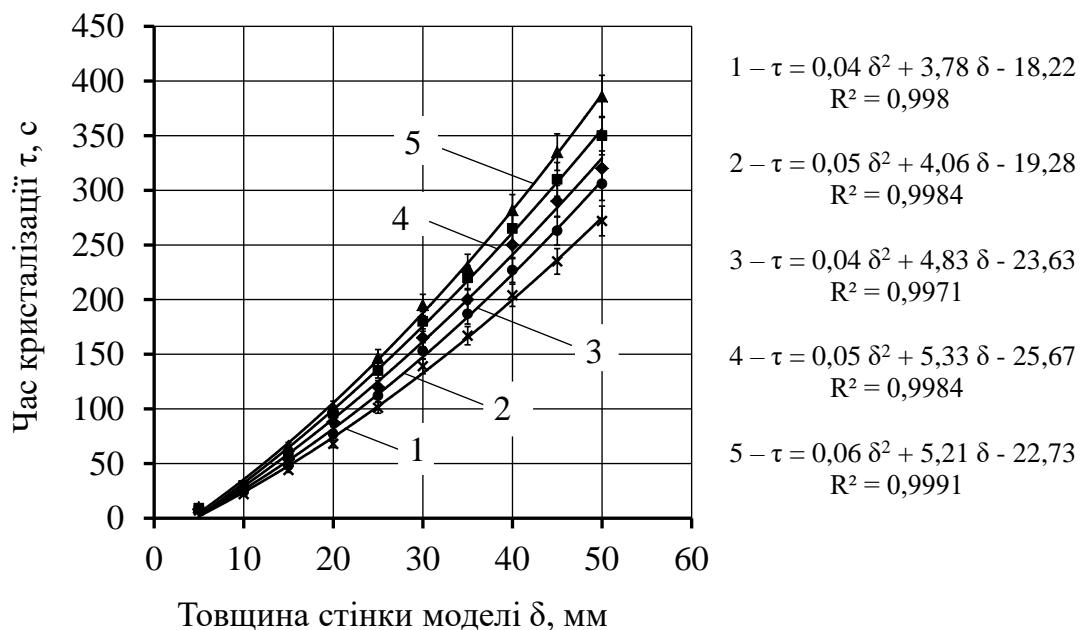


Рис. 4.4. Схема моделювання процесу заливання та кристалізації чавуну



1 – 1300 °C; 2 – 1350 °C; 3 – 1400 °C; 4 – 1450 °C; 5 – 1500 °C

Рис. 4.5. Вплив товщини стінки моделі на час кристалізації при різних температурах заливання

За отриманими результатами встановлено, що з температури заливання 1300 °С першого шару вилівка товщиною 25 мм час його кристалізації становить 90-100 с. Можна припустити, що за такої витримки між етапами заливання гідродинамічне перемішування чавунів всередині ливарної форми не відбувається. Його відсутність є важливою умовою для отримання виливків з диференційованими властивостями. Таким же чином час кристалізації можна визначити і для випадків з більш високими температурами заливання. Для підтвердження результатів моделювання обрано наступні часові інтервали між етапами заливання: 30, 60, 90 і 120 с.

4.1.2 Виробництво двошарового чавунного виливка з поєднанням шарів сірого та білого чавунів

Диференціація властивостей за висотою перерізу стінки виливка досягається завдяки встановленню оптимального часового інтервалу між заливанням нижньої частини порожнини ливарної форми крізь ливникову систему без реакційної камери вихідним доєвтектичним чавуном, схильним до кристалізації за метастабільною діаграмою, з наступним доливанням форми тим самим чавуном крізь іншу ливникову систему з реакційною камерою, де відбувається його графітизувальне модифікування. В результаті чого за висотою перерізу стінки формується двошаровий виливок: зносостійкий білий чавун – сірий чавун.

Форми заливали доєвтектичним чавуном ($C_e = 2,94-3,15 \%$). Температура заливання першої порції чавуну становила 1350 ± 10 °С. Заливання проводили відкритим ручним ковшем ємністю 5 кг через вільну ливникову систему. Температура доливання форм становила 1380, 1420, 1460 ± 10 °С через ливникову систему з реакційною камерою із графітизувальним модифікатором ФС75. Сумарний переріз живильників забезпечував ламінарний режим руху розплаву.

Відомо, що дифузійна гомогенізація хімічного складу металу за всім об'ємом залитої форми, разом з іншими перевагами, багато в чому сприяє широкому впровадженню технології внутрішньоформового модифікування у практику виробництва монолітних деталей з високоміцного чавуну [73, 77, 78, 80]. Флуктуаційна неоднорідність структури і властивостей чавуну в окремих частинах виливка при дотриманні оптимальних параметрів процесу внутрішньоформового модифікування не підтверджується в умовах виробництва.

Але відомо [83, 102, 116], що висока швидкість дифузійного перерозподілу елементів-модифікаторів в рідкому і твердо-рідкому стані до закінчення евтектичної кристалізації перешкоджає диференціації структури і властивостей чавуну в окремих частинах виливка. Відомо [17], що бар'єром, який знижує швидкість дифузійного перерозподілу кремнію за висотою перерізу стінки є тверда фаза на дзеркалі базового чавуну, залитого в нижню частину порожнини форми. Для її утворення необхідно забезпечити витримування у часі між етапами заливання форми. Дослідженнями встановлено, що час евтектичної кристалізації складає орієнтовно дві хвилини (рис.4.6), що співпадає з результатами моделювання (див. рис. 4.5). В подальших дослідженнях враховували отриманий результат.

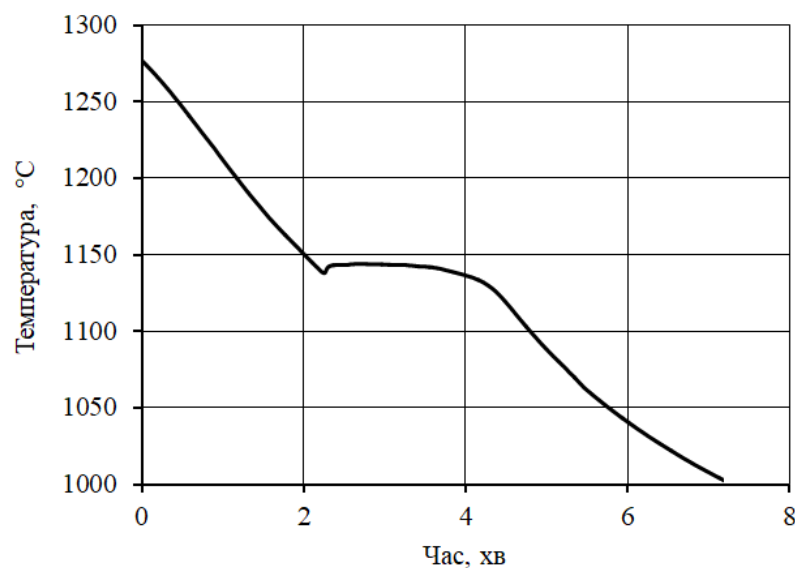


Рис. 4.6. Крива охолодження виливка

Позитивні результати диференціації структури досягли під час витримування між етапами заливання форм впродовж 60-480 с. Що підтверджується характером зміни твердості верхньої та нижньої поверхні виливка (рис. 4.7).

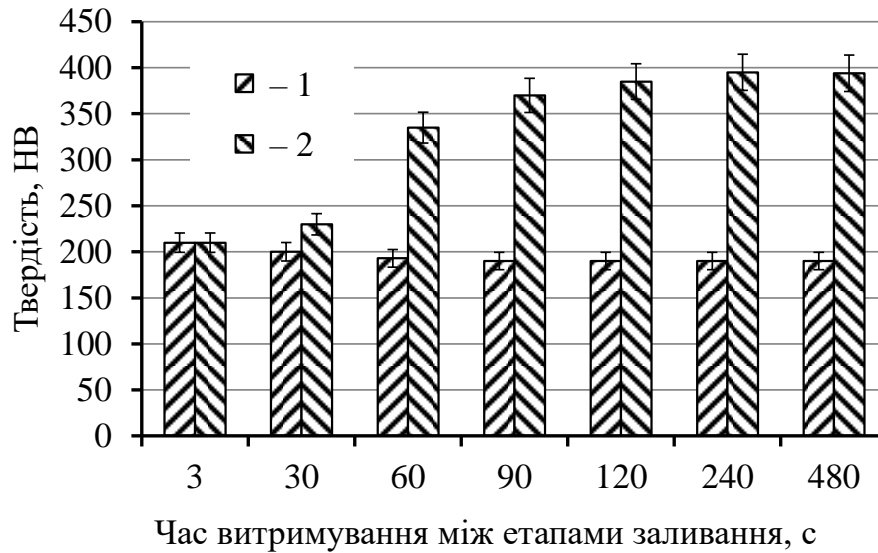
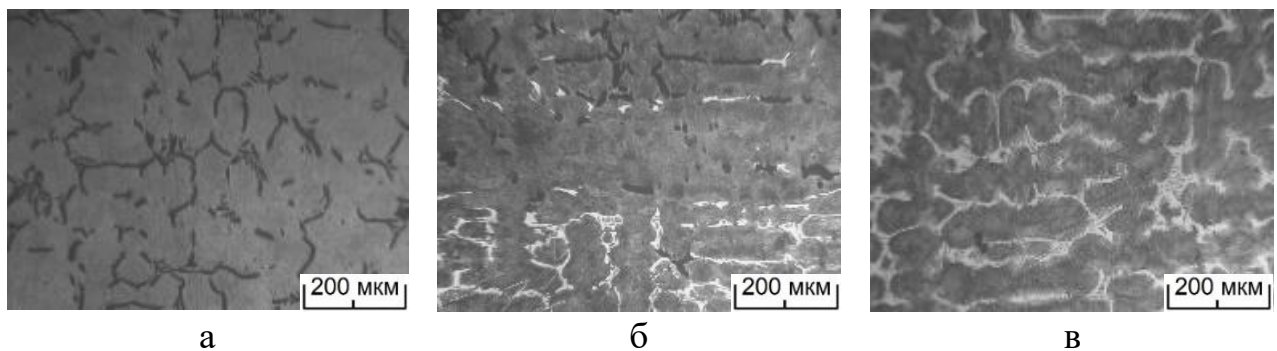


Рис. 4.7. Зміна твердості верхньої (1) і нижньої (2) поверхні виливка залежно від часу витримування між етапами заливання форми

Структура чавуну в нижньому шарі виливка не відрізняється від структури базового чавуну (рис. 4.8, в). Верхній шар виливка кристалізуються з модифікованого сірого чавуну з пластинчатим графітом (рис. 4.8, а) із утворенням перехідного шару (рис. 4.8, б).



а – верхній шар; б – перехідна зона; в – нижній шар

Рис. 4.8. Мікроструктура перерізу виливка висотою 50 мм із витримкою між заливаннями 90 с

Встановлено, що розмір перехідної зони між шарами виливка знаходиться в діапазоні від 203 до 503 мкм (рис. 4.9). Перехідна зона характеризується відсутністю будь-яких дефектів усадкового характеру та оксидних вкраплин.

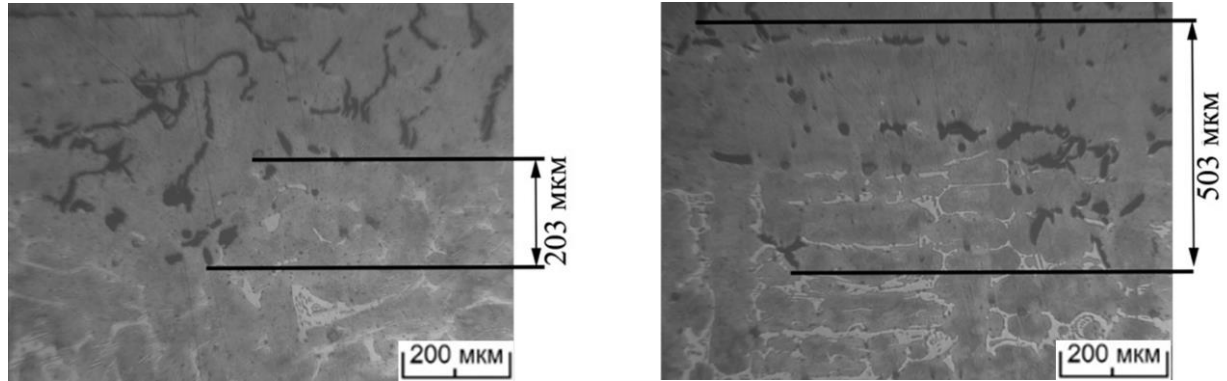


Рис. 4.9. Мікроструктура перехідної зони двошарового чавунного виливка із витримкою між заливаннями 90 с

За результатами досліджень механічних властивостей, визначено мікротвердість окремих структурних складових виливка (рис. 4.10, а) і проведено їх кількісне оцінювання (рис. 4.10, б).

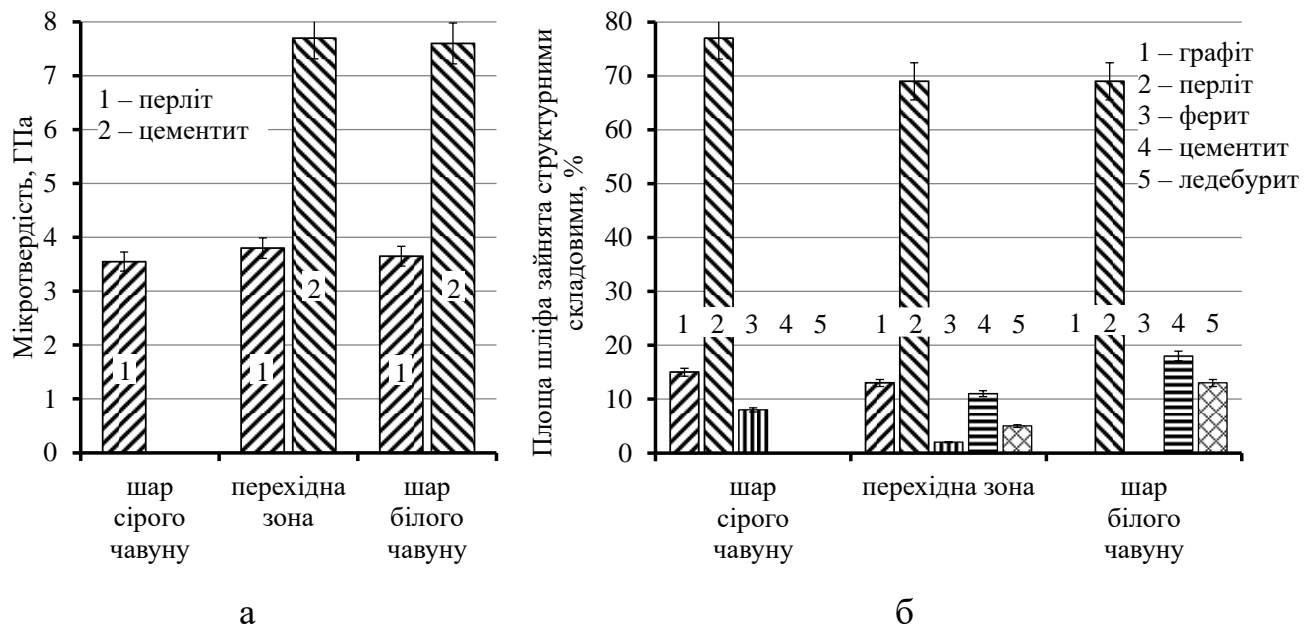


Рис. 4.10. Мікротвердість (а) і кількісний аналіз структурних складових (б) двошарового чавунного виливка із витримкою між заливаннями 90 с

При витримуванні між етапами заливання понад 120 с на поверхні залитої першої порції розплаву утворюється оксидна плівка, яка призводить до часткового розшарування виливка у перехідній зоні. Внаслідок випромінювання тепла відкритою поверхнею розплаву формувальна суміш, розташована над ним, втрачає міцність, що призводить до її відшарування та осипання на дзеркало розплаву та утворенню дефектів у вигляді піщаних раковин між шарами виливка (4.11).



а – обсіпання формувальної суміші; б – раковини та пори

Рис. 4.11. Характерні дефекти виливків за часу витримування між етапами заливання форми понад 120 с

Таким чином, встановлено, що найкращі результати отримали за часу витримування між етапами заливання від 60 до 120 с.

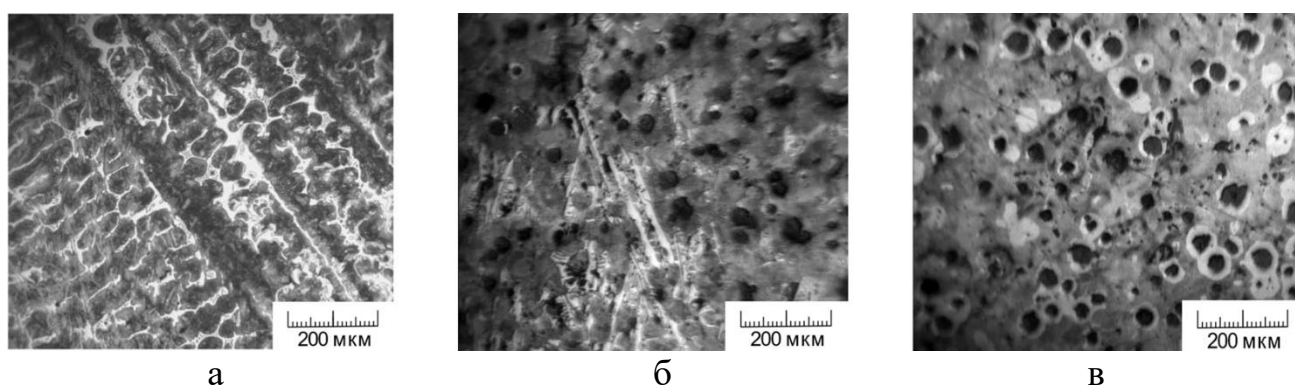
4.1.3 Виробництво двошарового чавунного виливка з поєднанням шарів високоміцного та білого чавунів

З літературних джерел встановлено [113], що для чавунних виливків, які працюють в умовах ударних навантажень, структура повинна бути перлітно-феритною з вкраплинами графіту кулястої форми. Для забезпечення отримання такої структури використовують сфероїдизувальне модифікування.

З метою забезпечення необхідної структури в роботі замість графітізувального застосували сфероїдизувальне модифікування. В реакційну камеру ливникової системи завантажували модифікатор ФСМг7 з розміром частинок 1,0-5,0 мм. Решту умов зберігали, як у попередніх дослідженнях.

В результаті проведених експериментів отримано двошарові виливки із нижньою частиною з білого чавуну, а верхньою – з високоміцного чавуну з кулястим графітом.

Аналіз мікроструктур виливка дозволяє зробити висновок, що рівномірні за товщиною шари білого і високоміцного чавуну з бездефектною перехідною зоною забезпечує витримка між етапами заливання від 60 до 120 с. Нижня частина виливка кристалізується за метастабільною діаграмою із вкраплинами структурно вільного цементиту та ледебуритної евтектики, які рівномірно розподілені у перлітній металевій матриці (рис. 4.12, а). Мікроструктура перехідної зони між шарами складається із дендритів цементиту, вкраплин ледебуритної евтектики та вкраплин графіту кулястої форми у перлітно-феритній металевій матриці (рис. 4.12, б). Мікроструктура верхнього шару поєднувала в собі вкраплини графіту кулястої форми з феритною оторочкою у перліто-феритній металевій матриці (рис. 4.12, в).



а – нижній шар; б – перехідна зона; в – верхній шар

Рис. 4.12. Мікроструктура перерізу виливка висотою 50 мм із витримкою між заливаннями 90 с з поєднанням шарів білого та високоміцного чавуну

Диференціація структури за перерізом виливка підтверджено зміною твердості. Встановлено, що під час одержання виливків з поєднанням шарів білого і високоміцного чавуну різниця твердості між його верхньою і нижньою площинами складає 140-160 НВ. Твердість поверхні високоміцного шару виливка у литому стані становить 220-240 НВ, а твердість поверхні шару білого

чавуну – 400-410 НВ (рис. 4.13). Необхідно зазначити, що за часу витримувannya між етапами заливання впродовж 30 с різниця твердості різних шарів виливка відсутня, внаслідок перемішування шарів в ливарній формі. Попередньо встановлено, що витримувannya 120 с і більше недоцільне, оскільки можливе утворення дефектів у перехідній зоні.

Встановлено, що в отриманих за такою технологією двошарових чавунних виливках з білого і високоміцного чавуну розмір перехідної зони по площині контакту між шарами знаходиться в діапазоні від 690 мкм до 875 мкм (рис. 4.14). Перехідна зона характеризується відсутністю будь-яких дефектів, пов'язаних з утворенням пор і раковин, а також оксидних краплин, які можливі у виливках, отриманих за схожими технологіями, що дозволяє забезпечити якісне поєднання шарів і надійну роботу виливка в умовах ударно-абразивного зношування.



1 – шар високоміцного чавуну; 2 – шар білого чавуну

Рис. 4.13. Вплив часу витримувannya між етапами заливання на твердість шарів виливка

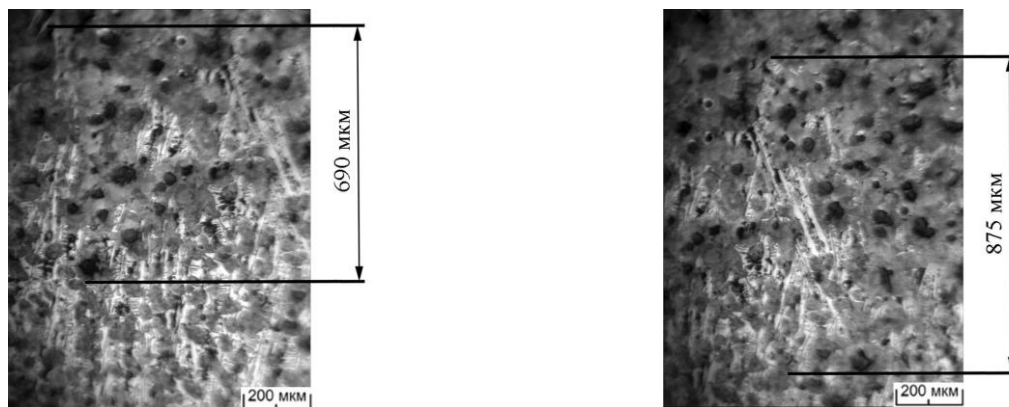


Рис. 4.14. Мікроструктура перехідної зони двошарового чавунного виливка із витримкою між заливаннями 90 с

За результатами досліджень проведено кількісне оцінювання окремих структурних складових виливка (рис. 4.15). В результаті якого встановлено, що у робочому шарі виливка відсутня феритна фаза, наявність якої у матеріалі основи до 15 % сприяє підвищенню експлуатаційних властивостей виливка в умовах ударного навантаження.

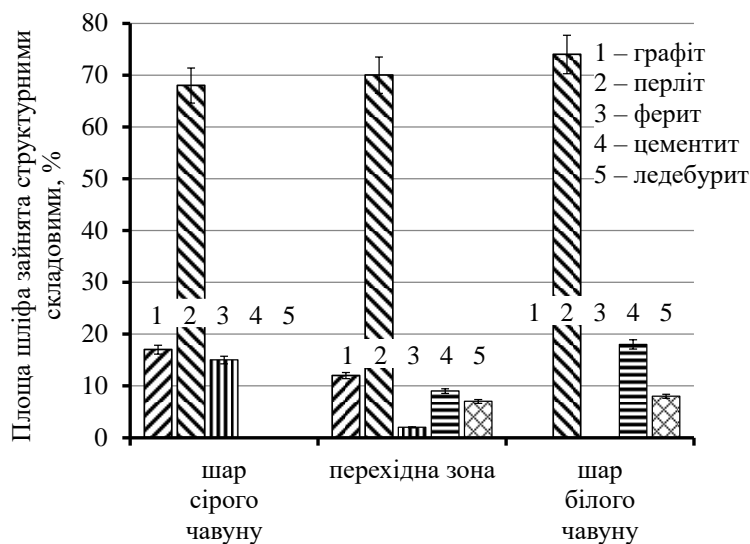
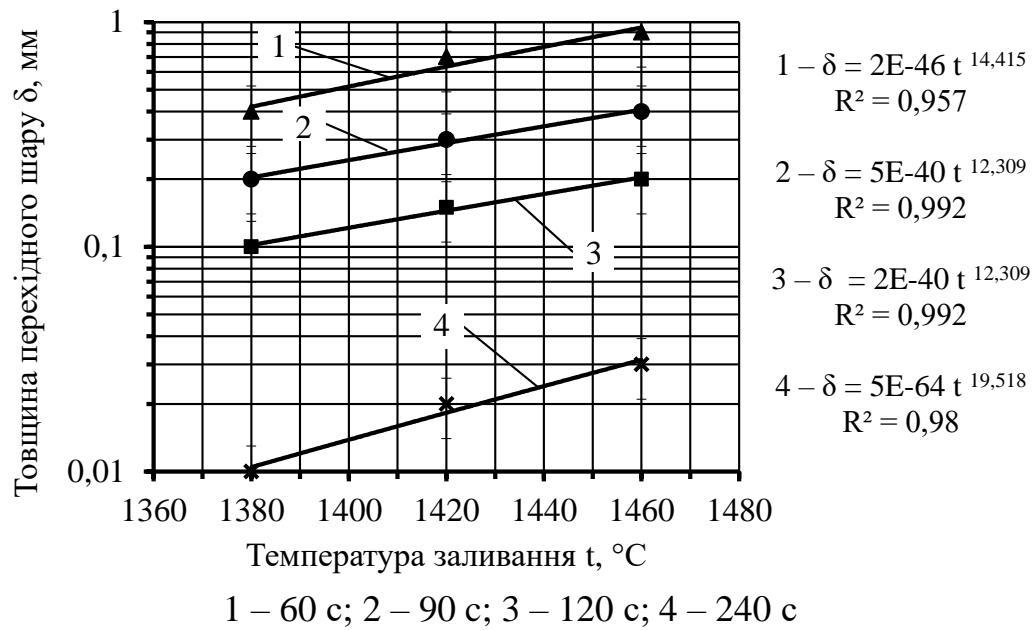
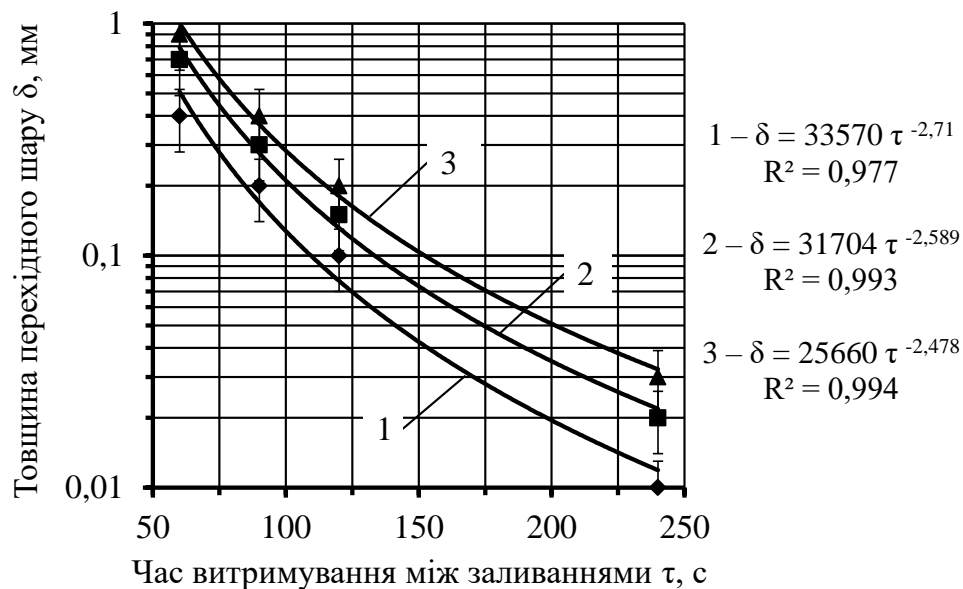


Рис. 4.15. Структурні складові чавуну двошарового виливка з шаром високоміцного та білого чавуну із витримкою між заливаннями 90 с

З метою встановлення товщини перехідної зони досліджено вплив температури заливання від 1380 до 1460 °C та часу витримування між етапами заливання (рис. 4.16).



а



б

Рис. 4.16. Залежність товщини перехідного шару виливків від температури заливання (а) та часу витримання між заливаннями (б)

Встановлено, що зі збільшенням часу витримання з 3 до 240 с товщина перехідної зони зменшується внаслідок охолодження першого шару залитого чавуну і зменшення глибини його підплавлення другим. Цей недолік можна виправити підвищенням температури заливання другої порції розплаву.

Встановлено, що підвищення температури заливання від 1380 до 1460 °C за часу витримування 90 с сприяє підвищенню товщини перехідного шару від 0,2 до 0,8 мм.

Для одержання якісних виливків, які працюють в умовах зношування, за дослідженою технологією необхідно використовувати наступні параметри технологічного процесу:

- температура заливання першого шару від 1300 до 1350 °C;
- температура доливання другого шару від 1440 до 1460 °C;
- час витримування між етапами заливання від 60 до 120 с.

За розробленою технологією виготовлено промислові виливки (Додаток А).

4.2 Диференціація структури чавунного виливка за технологією виготовлення з використанням зовнішнього холодильника

Розглянута вище технологія має певні недоліки. Відхилення від встановлених часових інтервалів витримування між етапами заливання та температурних режимів заливання призводить до утворення дефектної перехідної зони та, як наслідок, неякісних виливків.

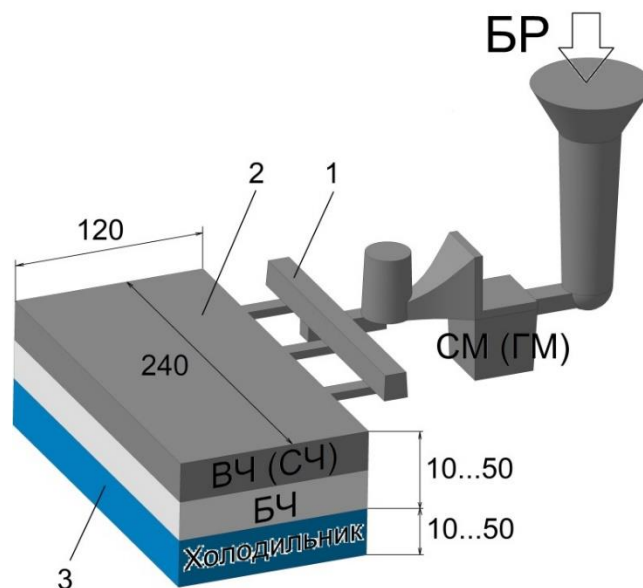
З метою усунення недоліків та спрощення попередньої технології досліджено новий спосіб отримання двошарових чавунних виливків, сутність якого полягає у заливанні розплаву у ливарну форму, де він проходить внутрішньоформове оброблення та заповнює порожнину форми. Для забезпечення отримання диференціації шарів, в порожнину форми попередньо встановлено зовнішній холодильник. Частина виливка, яка не контактує з холодильником, кристалізується із структурою графітизованого чавуну з пластинчастою або кулястою формою графіту залежно від обраного складу базового чавуну та типу модифікатора (рис. 4.17).

При цьому глибину робочого шару можна регулювати відповідно до заданого експлуатаційного ресурсу виливка.

Для вирішення поставлених завдань в роботі досліджено процеси кристалізації модифікованих чавунів у порожнині ливарної форми з метою

встановлення закономірностей структуроутворення та формування властивостей металу в двошарових виливках.

Відомо [79], що для чавунів існує критична швидкість охолодження, при досягненні якої змінюється характер кристалізації чавуну зі стабільної системи з виділенням графіту у вільному стані на кристалізацію за метастабільною системою з вкраплинами структурно вільного цементиту або цементиту ледебурита.



СЧ – сірий чавун; СМ – сфероїдизувальний модифікатор; 1 – ливникова система; 2 – виливок; 3 – зовнішній холодильник

Рис. 4.17. Схема технологічного процесу отримання двошарових виливків із використанням зовнішнього холодильника

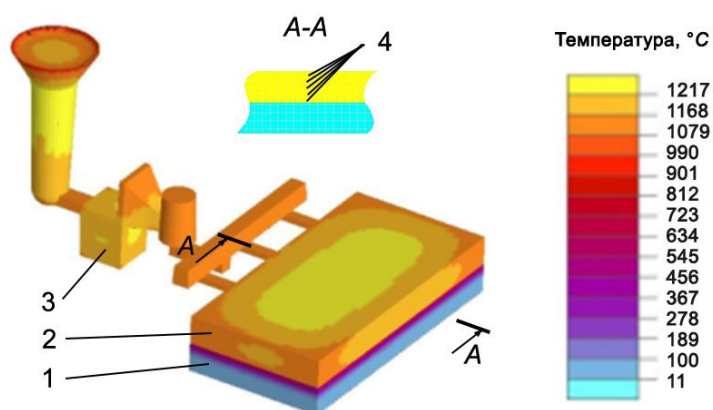
Для визначення глибини вибіленого шару необхідно встановити швидкості охолодження за перерізом виливка і порівняти їх із значеннями критичної швидкості для конкретного сплаву.

4.2.1 Встановлення параметрів технологічного процесу моделюванням

Використання методу моделювання дозволяє чітко зафіксувати умови процесу заливання, кристалізації і охолодження розплаву, записати криві

охолодження в будь-якій точці виливка і провести необхідну кількість циклів моделювання при мінімальних витратах.

Розміри виливка, як і розміри зовнішнього холодильника, становили 240×120 мм, що забезпечило виключення впливу граничних умов на швидкість охолодження її центральної частини (рис. 4.18), в якій проводили запис кривих охолодження. Товщини перетину моделей змінювали в діапазоні від 10 до 50 мм з кроком 10 мм. Температура заливання розплаву становила 1400° С. Інші технологічні параметри процесу заливання під час моделювання обрані як для типового процесу виробництва чавунних виливків у формах з піщано-глинистої суміші з урахуванням використання методу внутрішньоформового сфероїдизувального модифікування чавуну (див. п. 2.8).

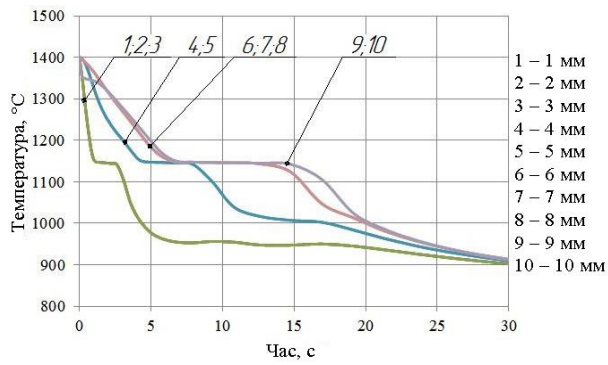


1 – зовнішній холодильник; 2 – виливок; 3 – реакційна камера;
4 – термопари

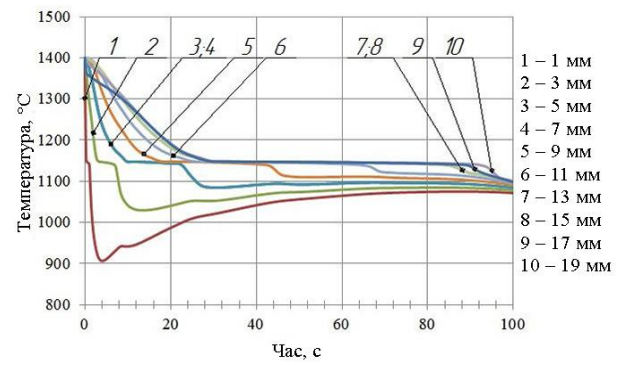
Рис. 4.18. Схема моделювання процесу заливання, кристалізації та охолодження чавунного виливка

Під час моделювання процесу кристалізації виливка спостерігали за кривими охолодження, які записувалися за допомогою термопар (поз.4, рис. 4.18), розташованих по центру моделі виливка і розподілених рівномірно по всій товщині його перетину з кроком 1 мм.

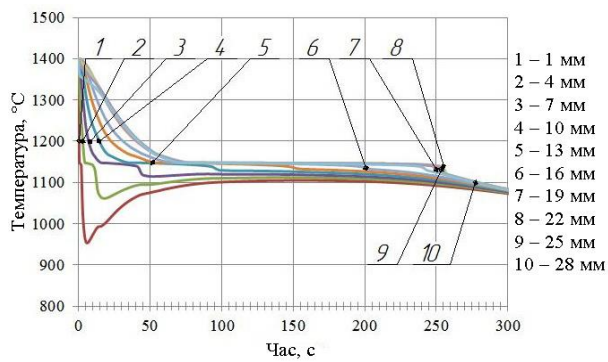
За результатами моделювання було отримано масив даних у вигляді кривих охолодження для кожної термопари (рис. 4.19-4.23).



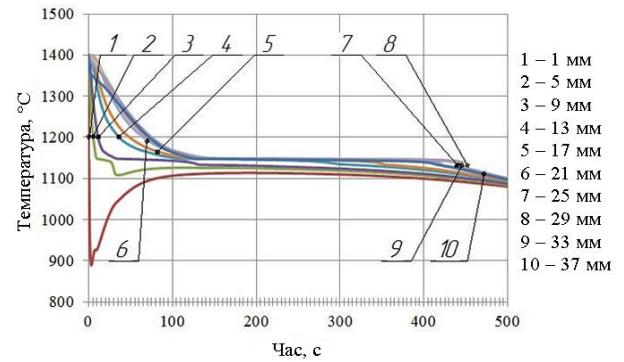
а



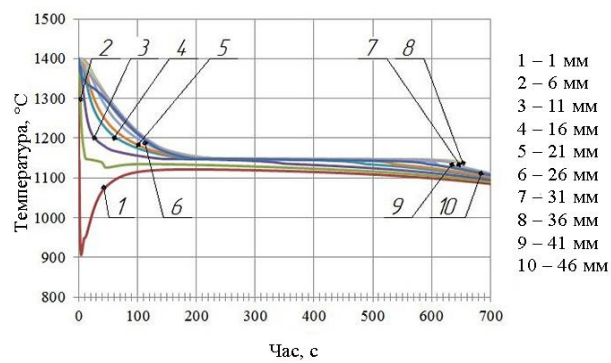
б



в



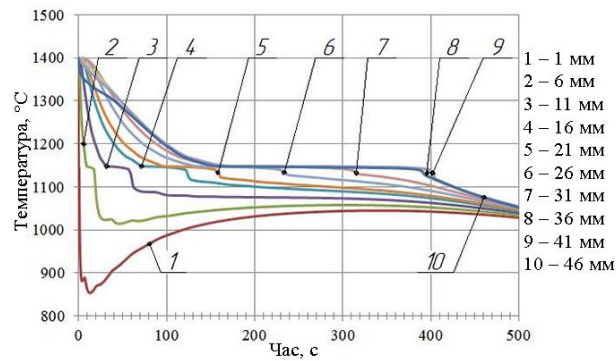
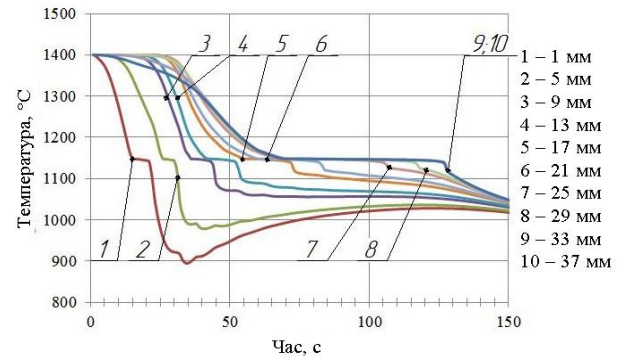
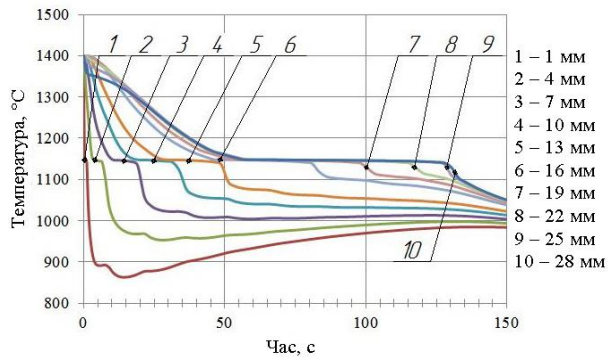
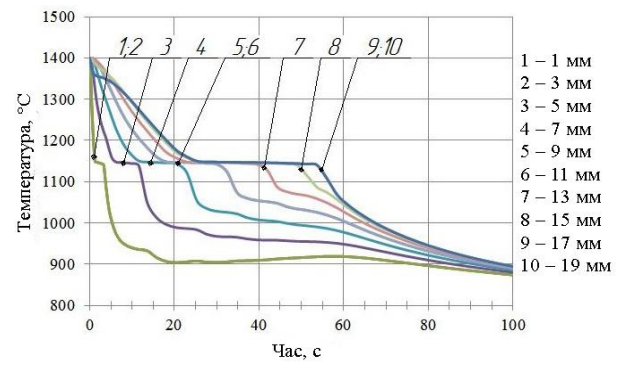
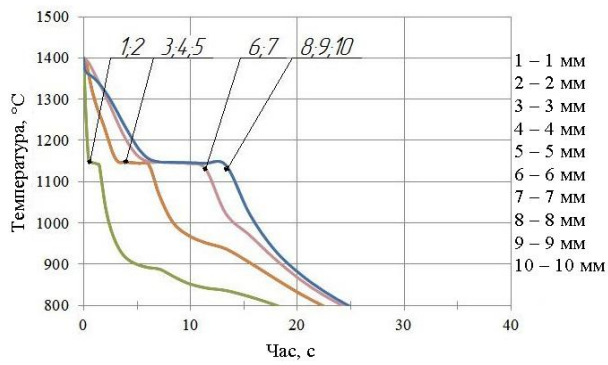
г



д

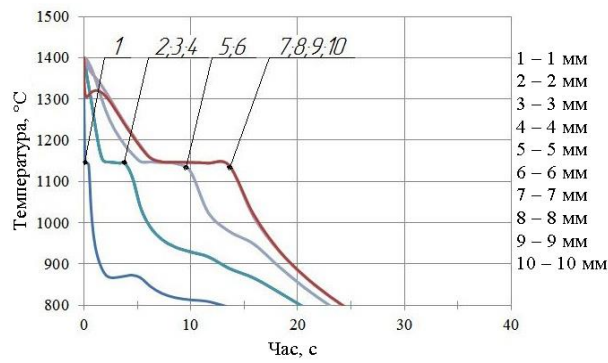
а – 10, б – 20, в – 30, г – 40, д – 50 мм

Рис. 4.19. Криві охолодження записані у центрі виливків з різною товщиною перерізу, виготовлених із використанням зовнішнього холодильника товщиною 10 мм, на різній відстані термопар від нього

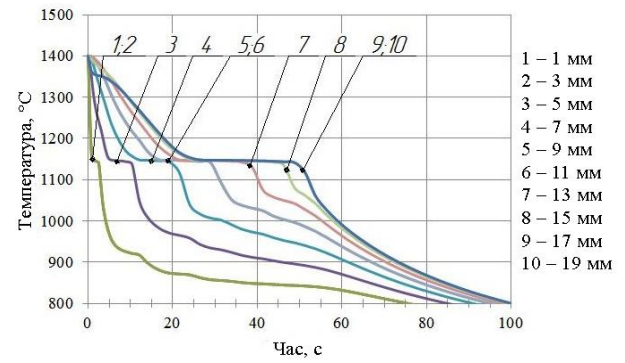


а – 10, б – 20, в – 30, г – 40, д – 50 мм

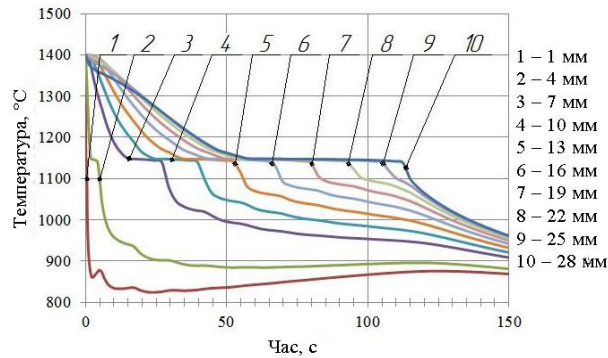
Рис. 4.20. Криві охолодження записані у центрі виливків з різною товщиною перерізу, виготовлених із використанням зовнішнього холодильника товщиною 20 мм, на різній відстані термопар від нього



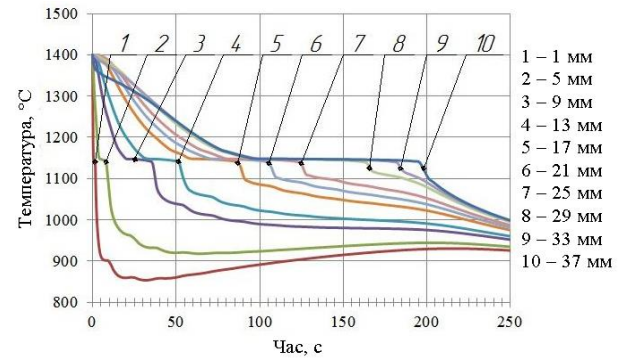
а



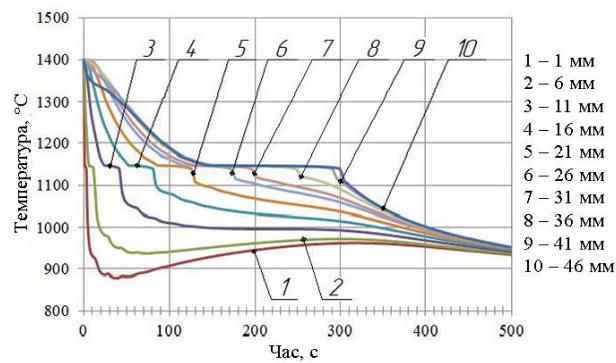
б



в



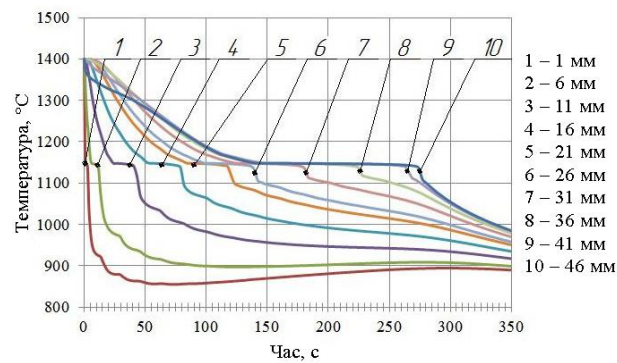
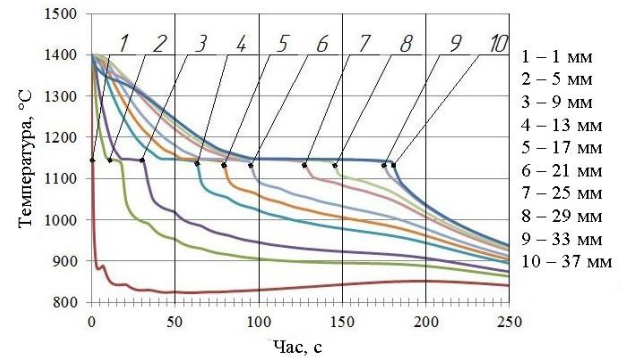
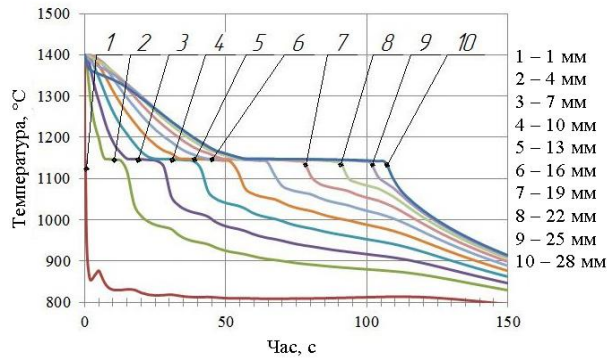
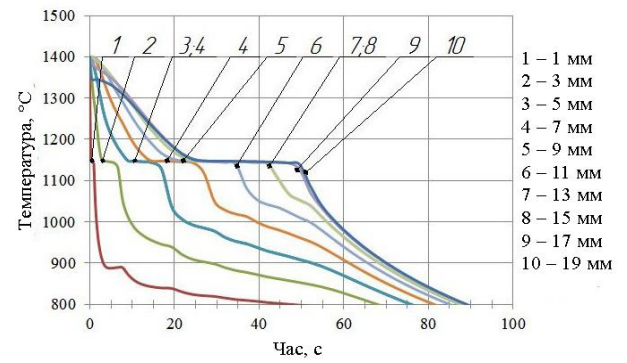
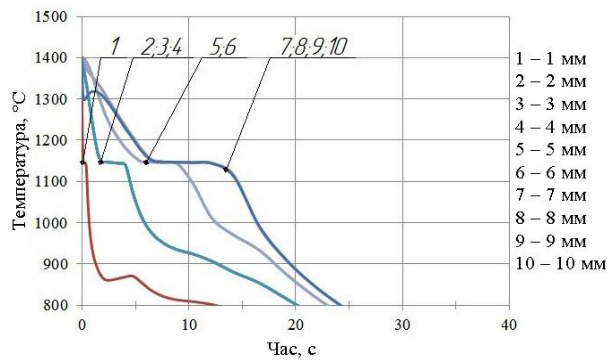
г



д

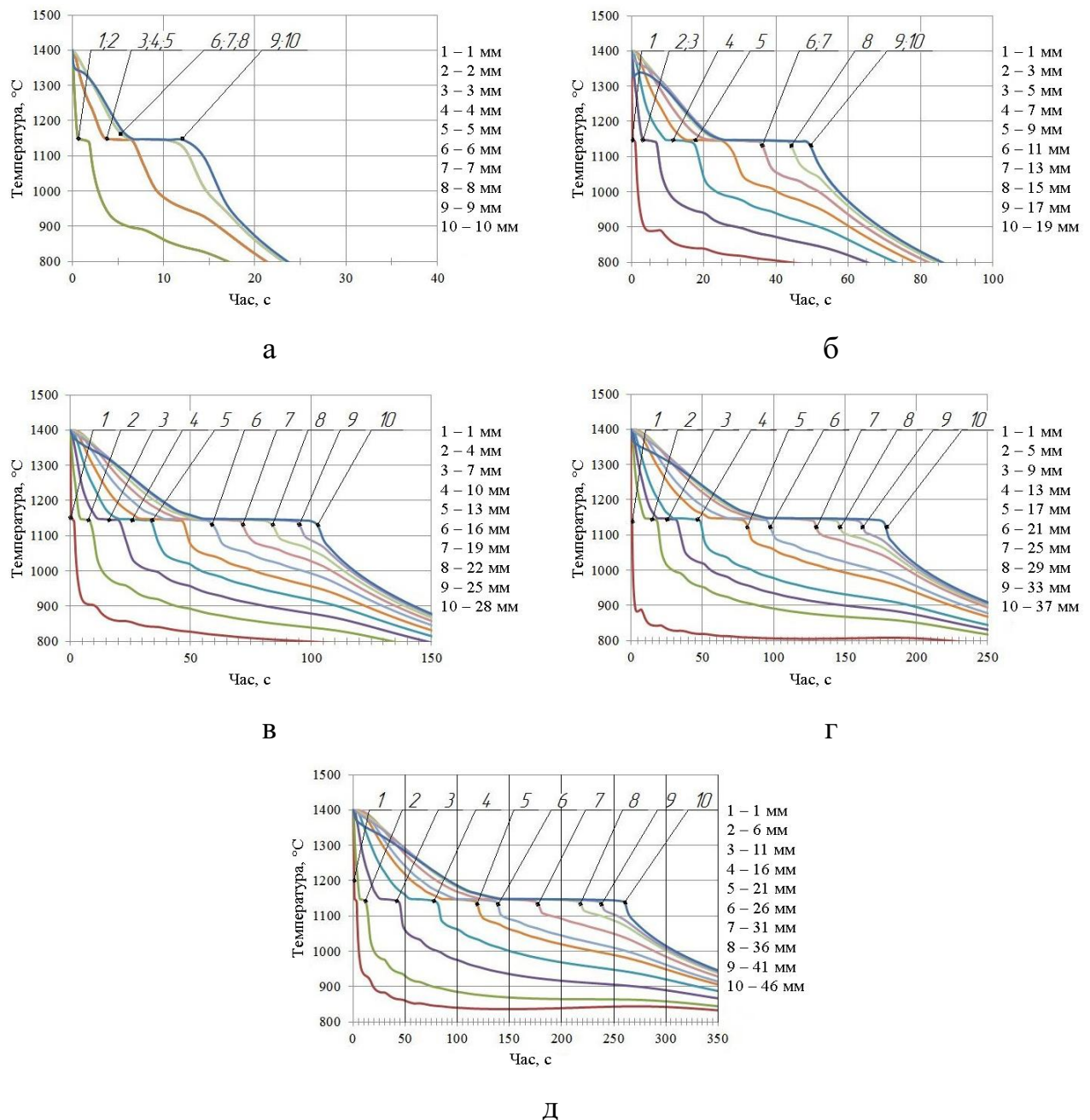
а – 10, б – 20, в – 30, г – 40, д – 50 мм

Рис. 4.21. Криві охолодження записані у центрі виливків з різною товщиною перерізу, виготовлених із використанням зовнішнього холодильника товщиною 20 мм, на різній відстані термопар від нього



а – 10, б – 20, в – 30, г – 40, д – 50 мм

Рис. 4.22. Криві охолодження записані у центрі виливків з різною товщиною перерізу, виготовлених із використанням зовнішнього холодильника товщиною 20 мм, на різній відстані термопар від нього



а – 10, б – 20, в – 30, г – 40, д – 50 мм

Рис. 4.23. Криві охолодження записані у центрі виливків з різною товщиною перерізу, виготовлених із використанням зовнішнього холодильника товщиною 20 мм, на різній відстані термопар від нього

Аналіз характеру зміни кривих охолодження (див. рис. 4.19-4.23) дає змогу зробити висновок, що час кристалізації в точках виливка, в яких були встановлені термопари, збільшується зі збільшенням відстані від термопари до зовнішнього холодильника. Таким чином, для моделі з товщиною зовнішнього

холодильника 10 мм та товщиною вилівка 10 мм (див. рис. 4.19, а) час кристалізації у точках, в яких було встановлено термopари, змінюється від 3 с до 15 с. Аналогічні результати, мінімального та максимального часу кристалізації, отримано і для інших товщин холодильна, які наведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Мінімальний (τ_{\min} , с) та максимальний (τ_{\max} , с) час кристалізації для точок вилівка, в яких було розташовано термopари

Товщина вилівка, мм		Товщина холодильника, мм				
		10	20	30	40	50
10	τ_{\min}	3	2	1	1	1
	τ_{\max}	15	13	13	13	13
20	τ_{\min}	3	3	3	1	1
	τ_{\max}	90	53	50	50	50
30	τ_{\min}	3	1	1	1	1
	τ_{\max}	255	128	113	107	103
40	τ_{\min}	3	2	2	1	1
	τ_{\max}	440	250	190	180	177
50	τ_{\min}	3	3	3	3	3
	τ_{\max}	650	400	300	275	262

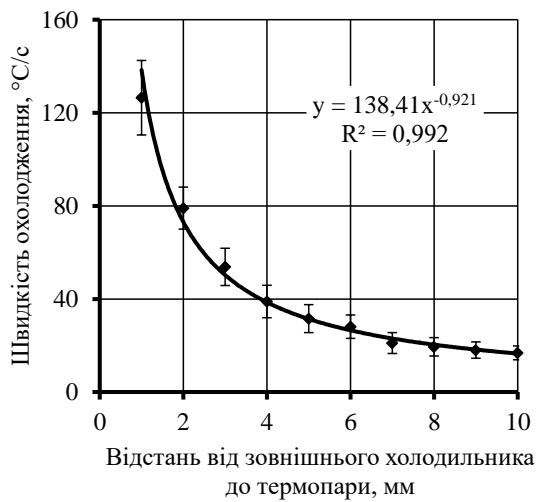
Установлено, що із збільшенням відстані від зовнішнього холодильника до точки вилівка, в якій було встановлено термopару, збільшується тривалість кристалізації відповідної точки вилівка. Збільшення тривалості кристалізації призводить до зменшення швидкості охолодження, яка, в свою чергу, буде впливати на формування структури чавунного вилівка. За мінімального часу формується структура білого чавуну з вкраплинами карбідів у металевій матриці, а із збільшення часу кристалізації чавун встигає кристалізуватися за стабільною діаграмою із утворенням структури сірого чавуну з пластинчастим графітом.

Швидкість охолодження в кожній точці виливка, в якій було встановлено термопару, визначали з відношення температурного інтервалу кристалізації сплаву до часу його кристалізації. Окремо, для кожного змодельованого варіанту за наведеним вище способом було обчислено швидкість охолодження в кожній точці, в якій було встановлено термопару. За отриманими значеннями швидкостей охолодження були побудовані графіки їхньої зміни залежно від положення термопар по відношенню до зовнішнього холодильника та проведена апроксимація отриманих кривих степеневою функцією (рис. 4.24-4.28).

З аналізу літератури [79] встановлено, що для чавуну, який було обрано для комп'ютерного моделювання та дослідження, з хімічним складом близьким до евтектичного (за температури 1600 °C: теплопровідність – 200 Вт/(м·K); питома теплоємність – 950 Дж/(кг·K); густина – 6600 кг/м³) критична швидкість охолодження, при досягненні та перевищенні якої відбувається кристалізація з вибіленням, становить 8,3 °C/с. При менших швидкостях охолодження виливок кристалізується за стабільною системою без вибілення.

За результатами розрахунків, для виливка товщиною 10 мм (рис. 4.24-4.28, а) швидкість охолодження в поперечному перерізі змінюється в межах від 140 °C/с до 20 °C/с. При цьому товщина холодильника в межах від 10 до 50 мм на зміну швидкостей охолодження суттєво не впливає. Оскільки наведені швидкості охолодження перевищують критичну, то виливок кристалізується з наскрізним вибіленням.

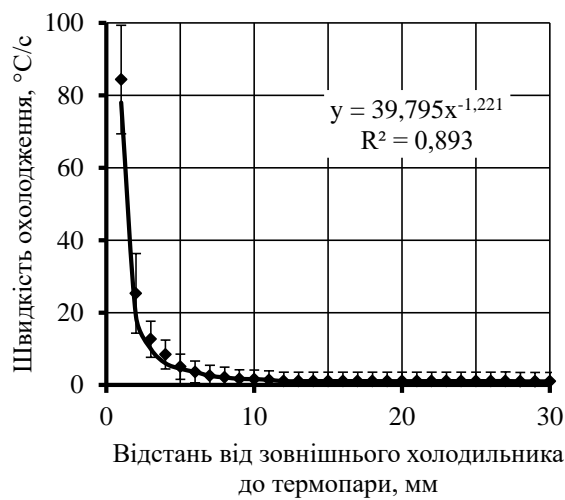
Для виливків з товщиною стінок 20, 30, 40 і 50 мм (рис. 4.24-4.28, б-д) швидкість охолодження в поперечному перерізі змінюється залежно від товщини виливка і холодильника. Значення максимальних (V_{\max}) та мінімальних (V_{\min}) швидкостей охолодження для даних виливків зведено до табл. 4.2.



а



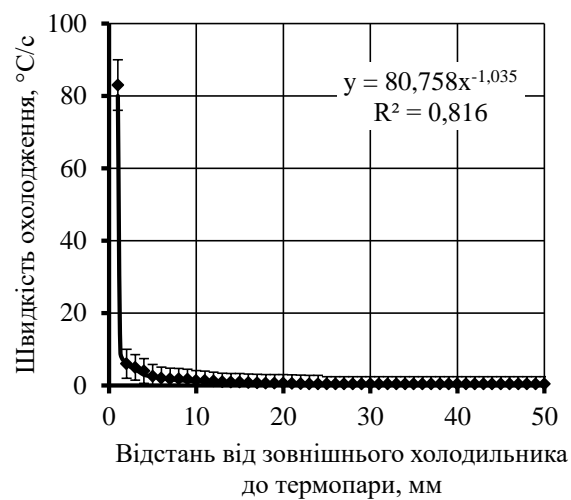
б



в



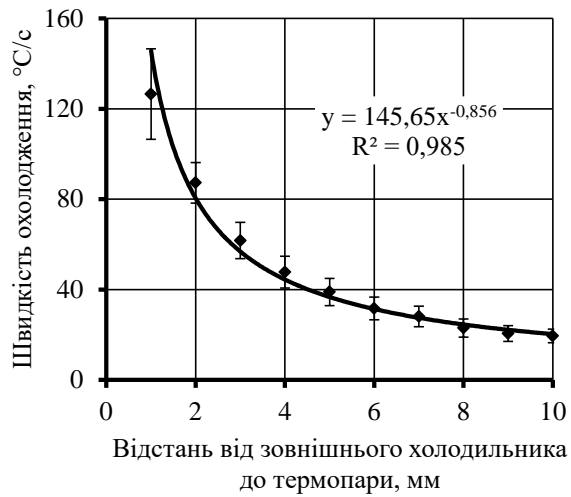
г



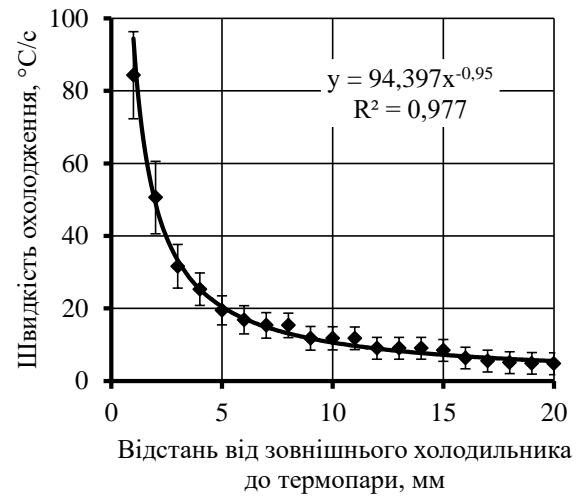
д

а – 10 мм, б – 20 мм, в – 30 мм, г – 40 мм, д – 50 мм

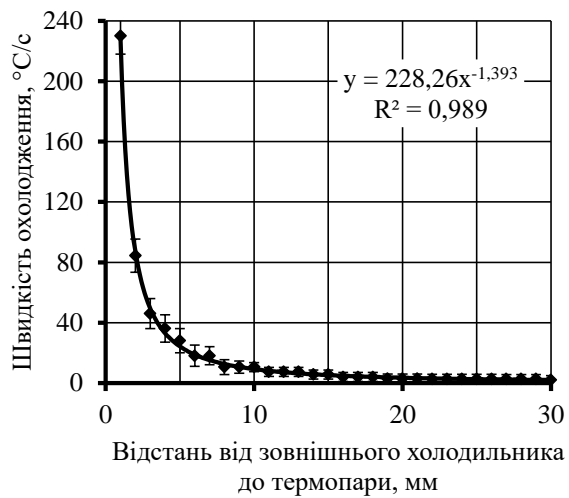
Рис. 4.24. Залежності швидкостей охолодження у виливках різної товщини з використанням зовнішнього холодильника товщиною 10 мм



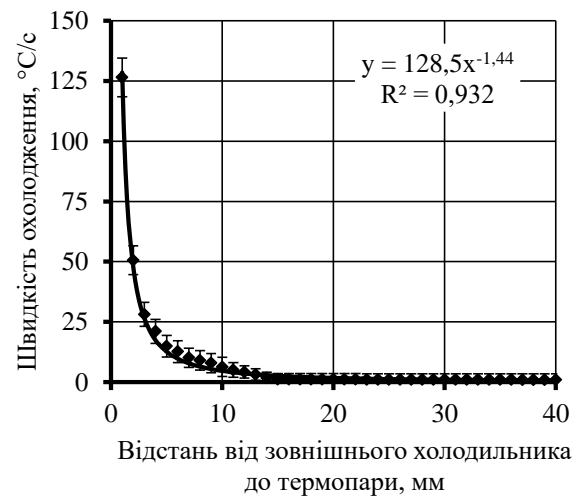
а



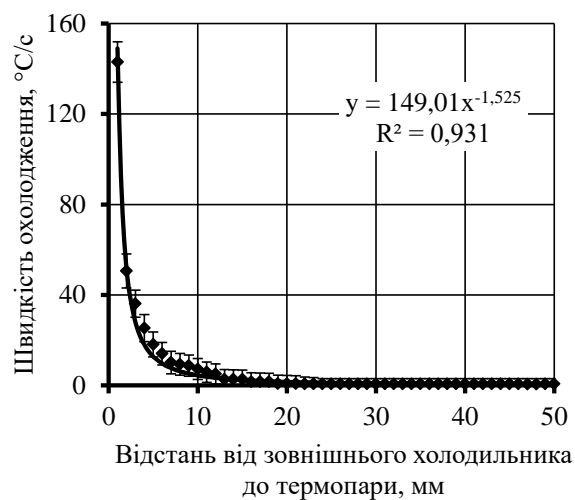
б



в



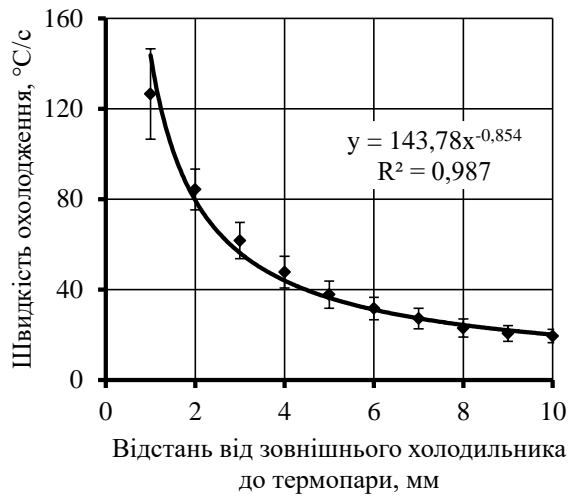
г



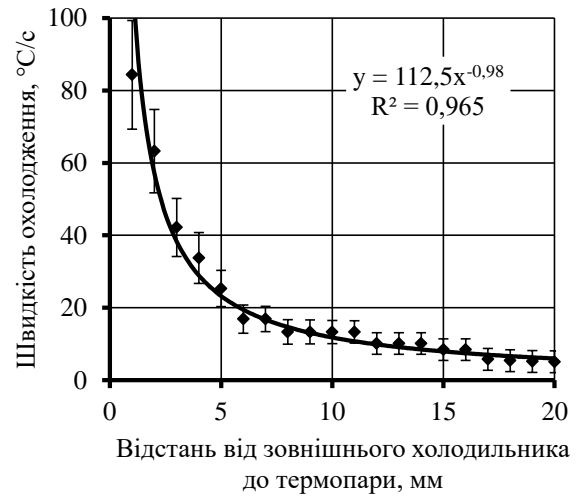
д

а – 10 мм, б – 20 мм, в – 30 мм, г – 40 мм, д – 50 мм

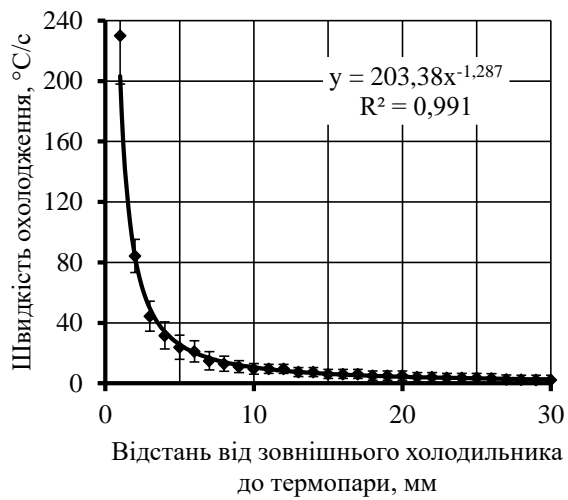
Рис. 4.25. Залежності швидкостей охолодження у виливках різної товщини з використанням зовнішнього холодильника товщиною 20 мм



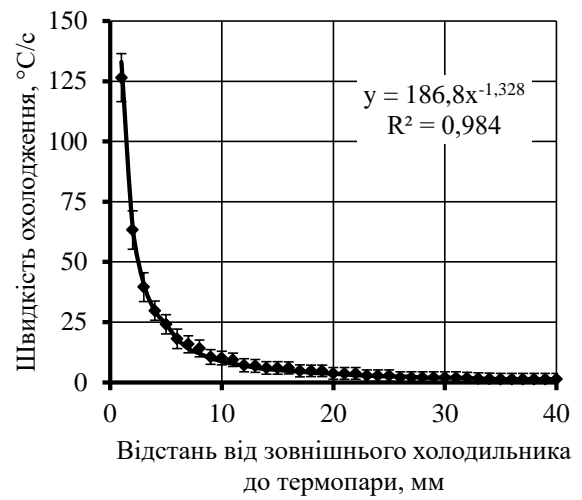
а



б



в



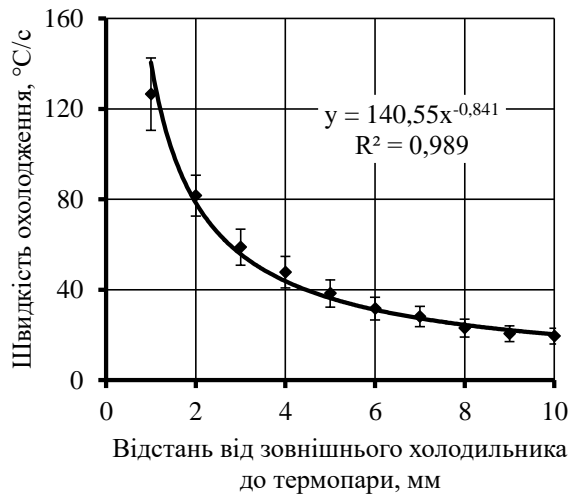
г



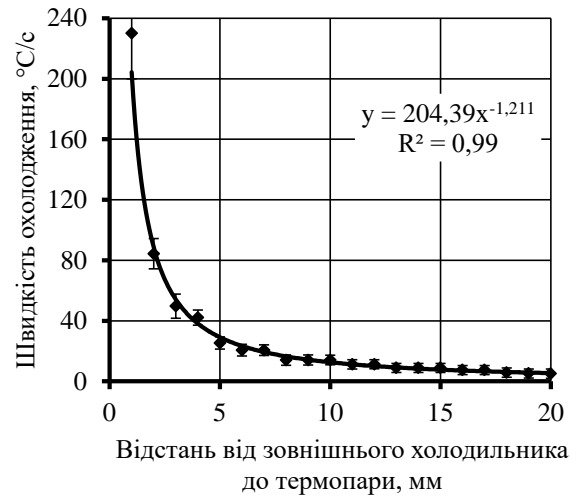
д

а – 10 мм, б – 20 мм, в – 30 мм, г – 40 мм, д – 50 мм

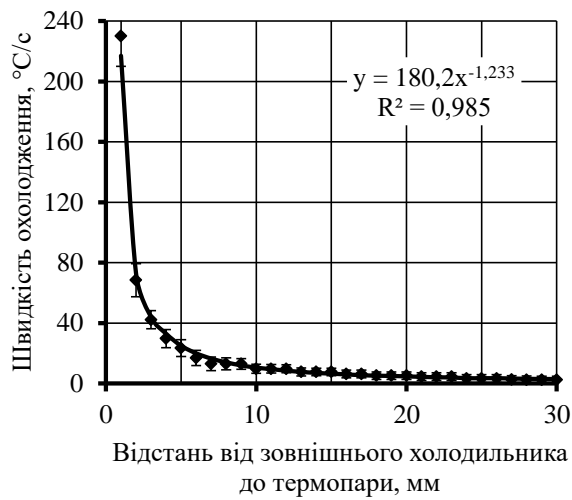
Рис. 4.26. Залежності швидкостей охолодження у виливках різної товщини з використанням зовнішнього холодильника товщиною 30 мм



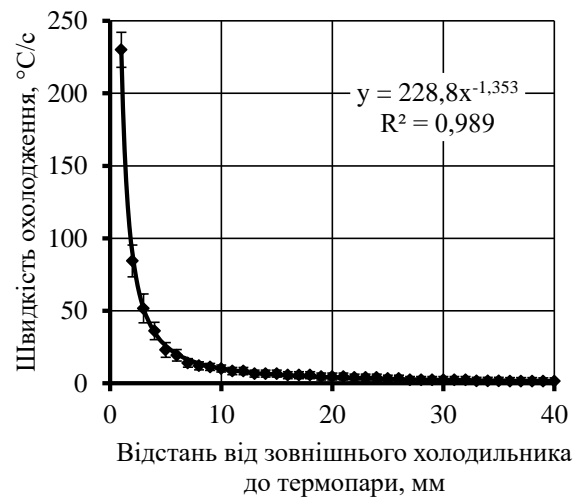
а



б



в



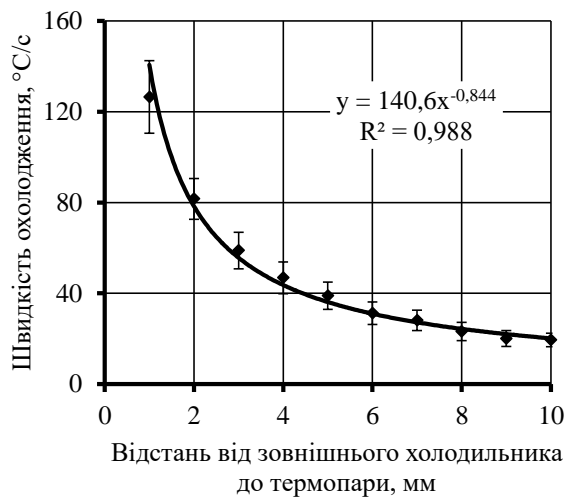
г



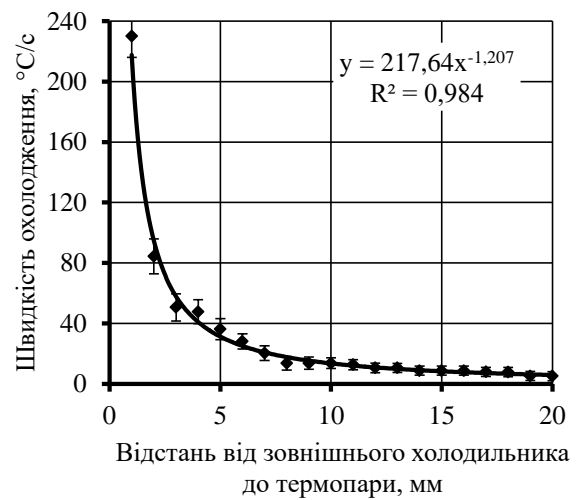
д

а – 10 мм, б – 20 мм, в – 30 мм, г – 40 мм, д – 50 мм

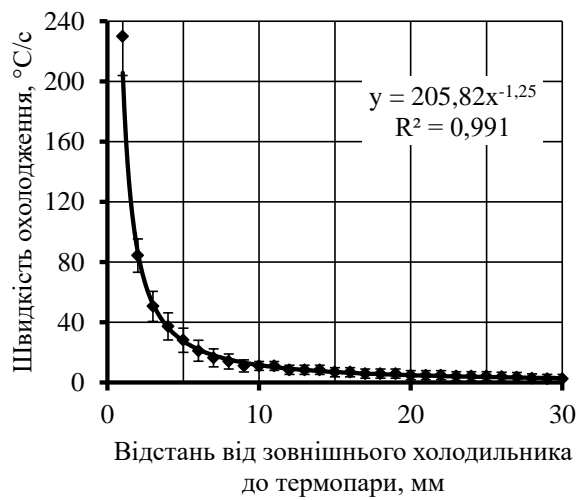
Рис. 4.27. Залежності швидкостей охолодження у виливках різної товщини з використанням зовнішнього холодильника товщиною 40 мм



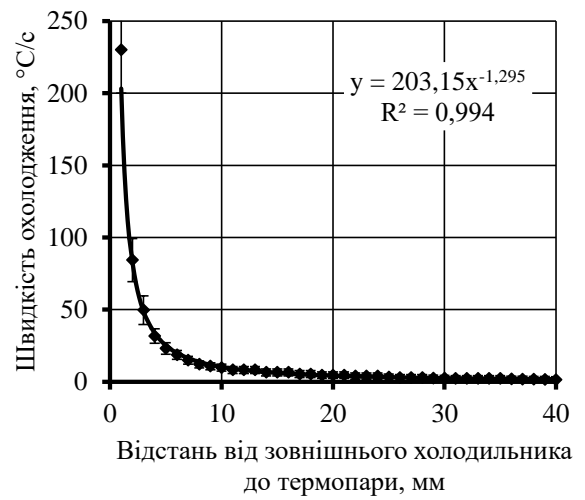
а



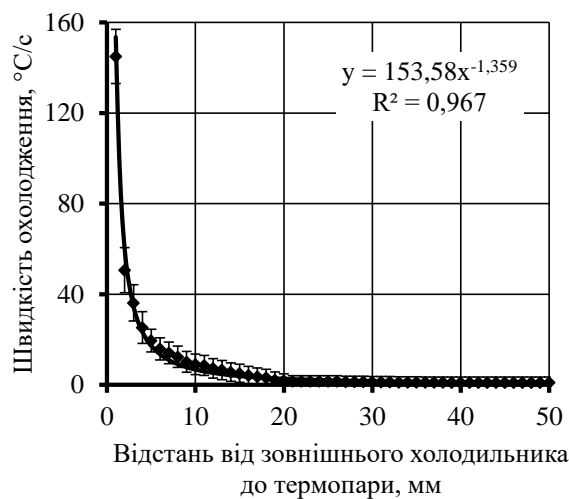
б



в



г



д

а – 10 мм, б – 20 мм, в – 30 мм, г – 40 мм, д – 50 мм

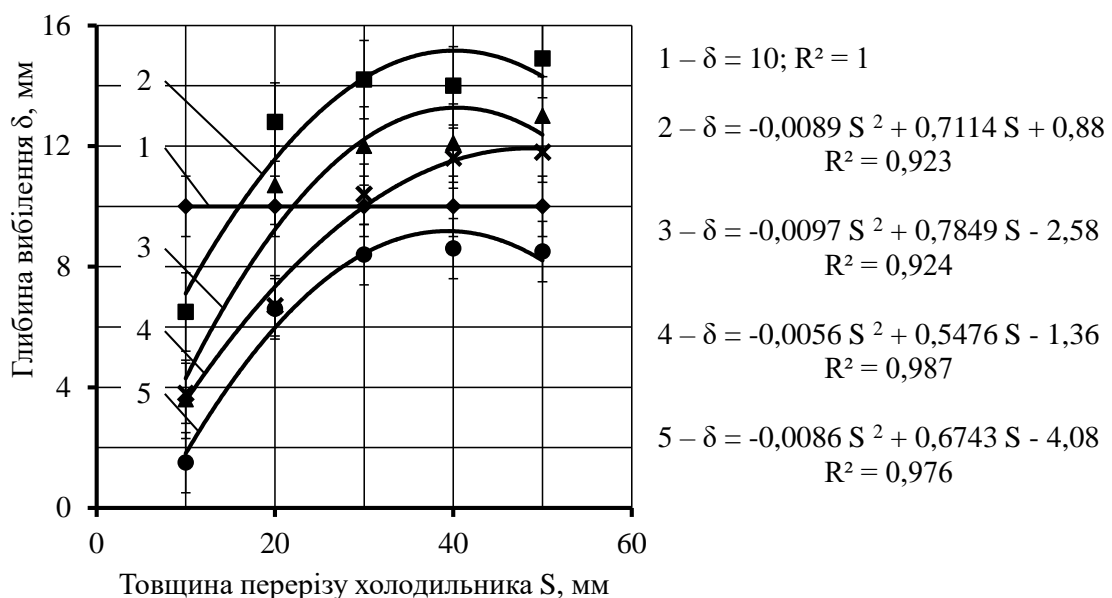
Рис. 4.28. Залежності швидкостей охолодження у виливках різної товщини з використанням зовнішнього холодильника товщиною 50 мм

Таблиця 4.2

Максимальні (V_{\max} , $^{\circ}\text{C}/\text{с}$) та мінімальні (V_{\min} , $^{\circ}\text{C}/\text{с}$) швидкості охолодження для точок виливка, в яких було розташовано термопари

Товщина виливка, мм		Товщина холодильника, мм				
		10	20	30	40	50
10	V_{\max}	138	144	145	145	145
	V_{\min}	17	20	20	20	20
20	V_{\max}	95	96	100	204	217
	V_{\min}	2	5,5	6,0	5,4	5,9
30	V_{\max}	79	228	203	217	206
	V_{\min}	0,6	2,0	2,6	2,7	2,9
40	V_{\max}	79	128	132	229	203
	V_{\min}	0,3	0,6	1,4	1,6	1,7
50	V_{\max}	79	149	178	169	154
	V_{\min}	0,2	0,4	0,6	0,7	0,8

За отриманими даними зміни швидкостей охолодження в поперечному перерізі виливка і значенням критичної швидкості охолодження для даного чавуну було визначено глибину, на яку виливок кристалізується з вибіленням за всіма змодельованими варіантами, і визначено залежності впливу товщини холодильника і виливка на глибину вибілення (рис. 4.29).



1 – 10 мм; 2 – 20 мм; 3 – 30 мм; 4 – 40 мм; 5 – 50 мм

Рис. 4.29. Вплив товщини перерізу холодильника на глибину вибілення для виливків із різною товщиною

Моделювання здійснювали і для доєвтектичного чавуну, схильного до кристалізації за метастабільною діаграмою, з використанням графітизувального модифікування, з метою отримання виливків із поєднанням білого та сірого чавуну. За результатами моделювання побудовано номограми для прогнозування глибини вибілення у виливках залежно від товщини виливка та холодильника (рис. 4.30).

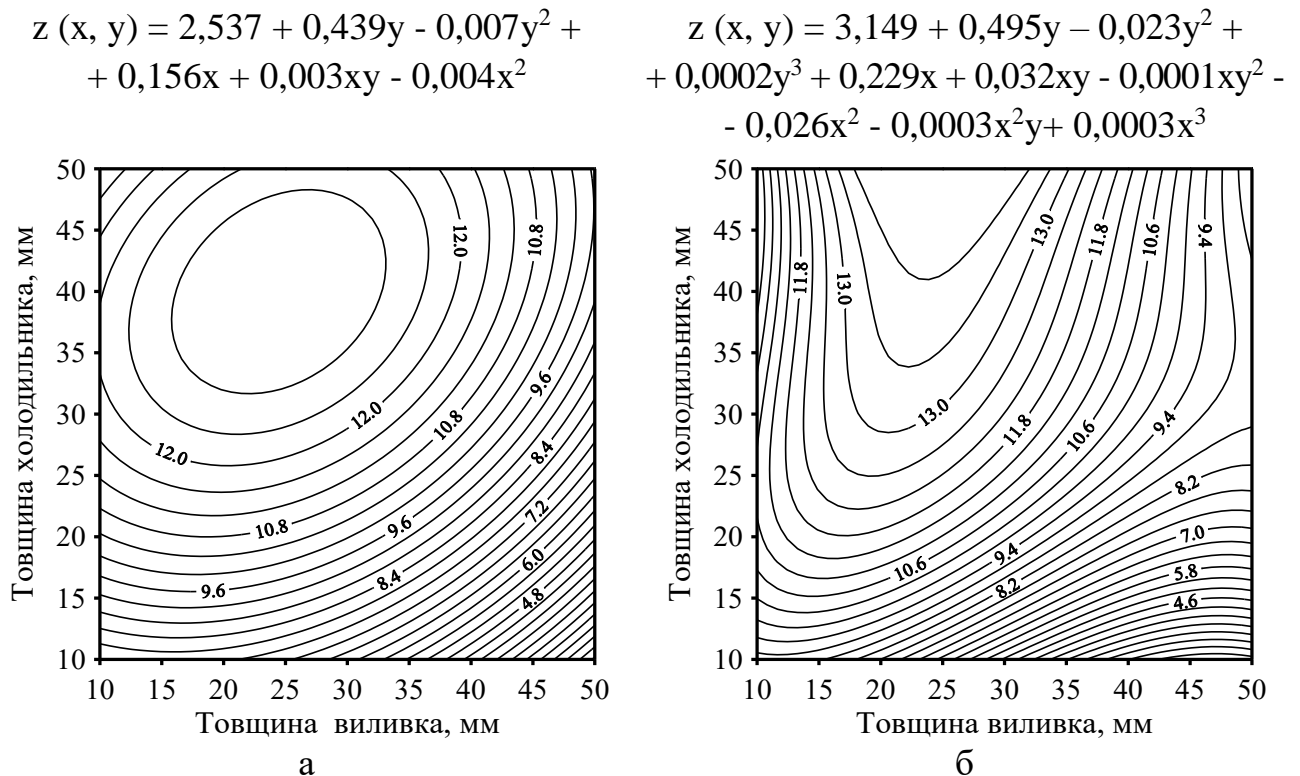


Рис. 4.30. Номограми для прогнозування глибини вибілення у двошарових чавунних виливках з шарами сірий-білий (а) та високоміцний-білий (б)

Номограма дозволяє вибрати геометричні параметри зовнішнього холодильника та виливка для забезпечення необхідної товщини робочого шару виливка.

4.2.2 Дослідження процесу формування виливка із градієнтною структурою

З метою підтвердження результатів моделювання проведено дослідження на чавунних виливках.

Для досліджень обрано виливки у вигляді плит з перерізами стінок 10, 20, 30, 40 та 50 мм, маса яких складала 2, 4, 6, 8 та $10 \pm 0,2$ кг відповідно.

Базовий чавун, схильний до кристалізації з виділенням графіту у вільному стані наступного хімічного складу, %: 3,4-3,6 C; 2,2-2,4 Si; 0,4-0,6 Mn; до 0,12 P; до 0,02 S – виплавляли в індукційній печі марки ICT-006 та заливали з температури 1400 ± 20 °C у сухі піщано-глинясті ливарні форми (рис. 4.31). Як модифікатор для сфероїдизувального оброблення базового розплаву чавуну використовували ФСМг7 у кількості 2,0 % від маси виливка, фракцією від 1,0 до 5,0 мм. Використання холодильника у вигляді плити з товщиною 30 мм забезпечує прискорене тверднення виливка внаслідок прискореного тепловідведення, що призводить до утворення робочої поверхні з твердого зносостійкого чавуну.



Рис. 4.31. Загальний вигляд верхньої частини ливарної форми

У центрі кожної форми встановлювали три термопари на різних відстанях від зовнішнього холодильника: знизу, зверху та по середині форми. Термографічним аналізом було отримано криві охолодження для виливків з товщинами 10, 20, 30, 40 та 50 мм. Після чого їх порівняли з кривими охолодження, записаними в результаті моделювання (рис. 4.32-4.36). За результатами порівняння можна зробити висновок про співпадіння інтервалів кристалізації в обох випадках, що дає можливість вважати достовірними результати моделювання в умовах поставленого експерименту.

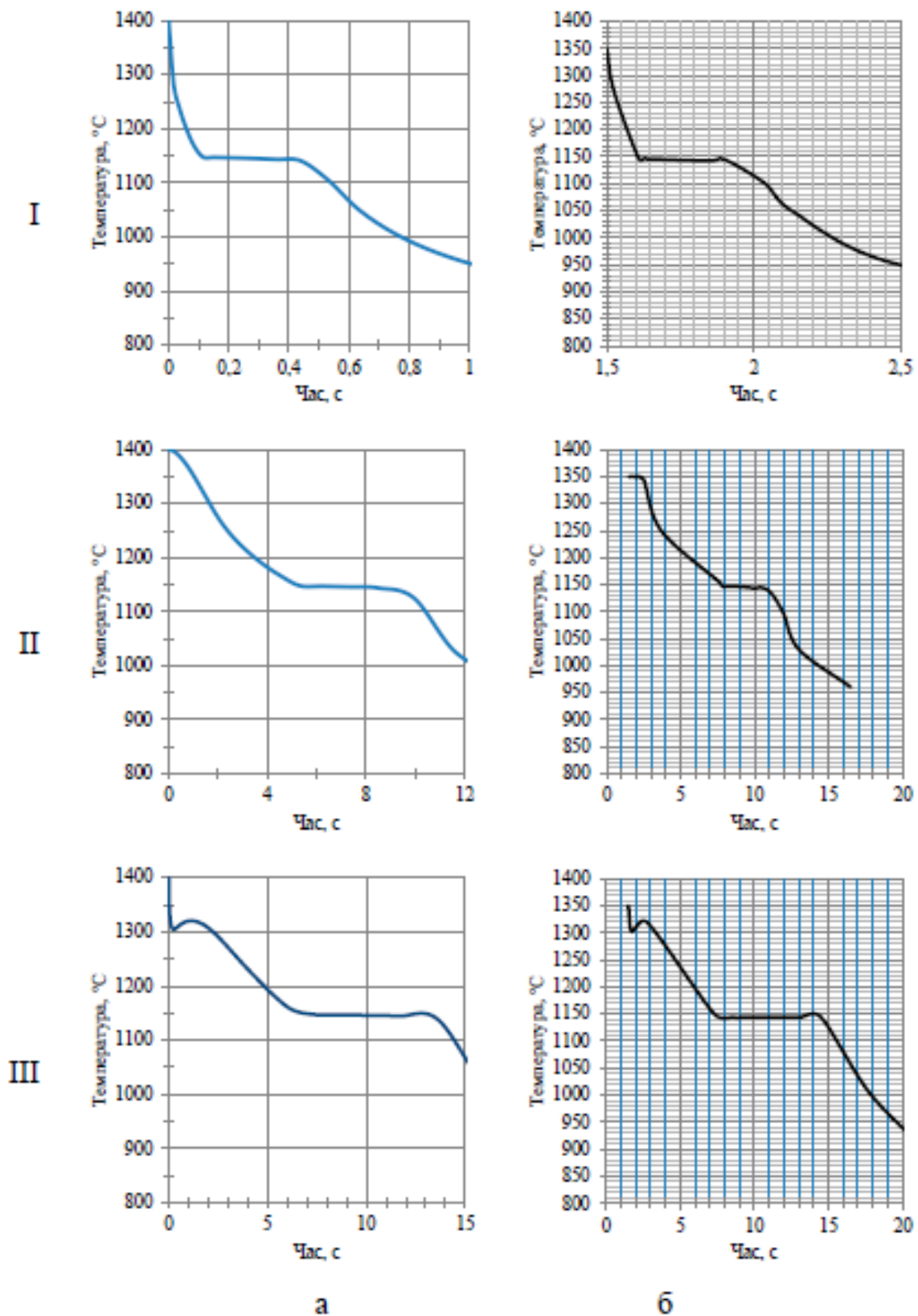


Рис. 4.32. Криві охолодження, записані за результатами моделювання (а) та натурального експерименту (б), для виливка товщиною 10 мм та зовнішнього холодильника товщиною 30 мм на мінімальній (I), середній (II) та максимальній (III) відстані від зовнішнього холодильника

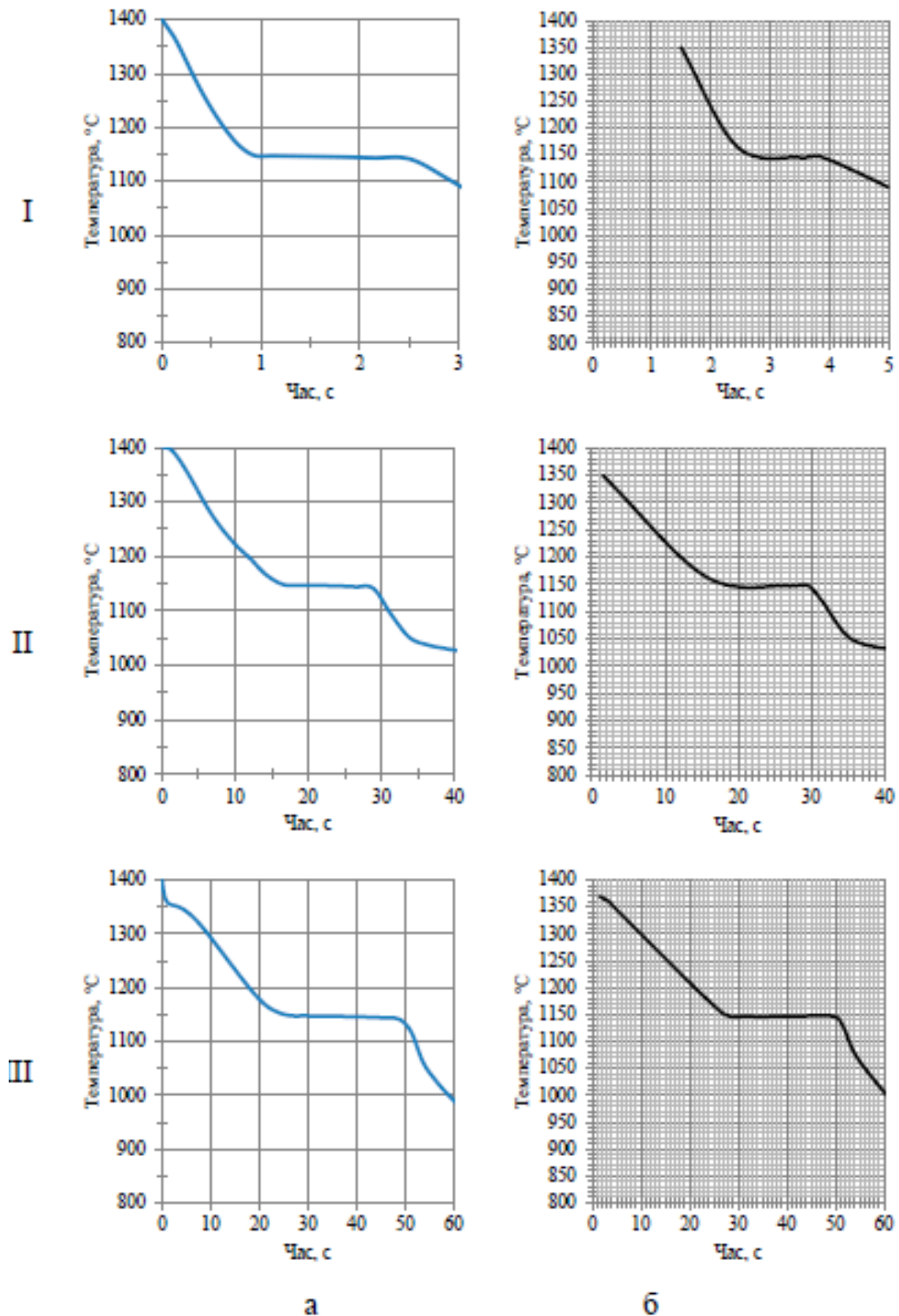


Рис. 4.33. Криві охолодження, записані за результатами моделювання (а) та натурального експерименту (б), для виливка товщиною 20 мм та зовнішнього холодильника товщиною 30 мм на мінімальній (I), середній (II) та максимальній (III) відстані від зовнішнього холодильника

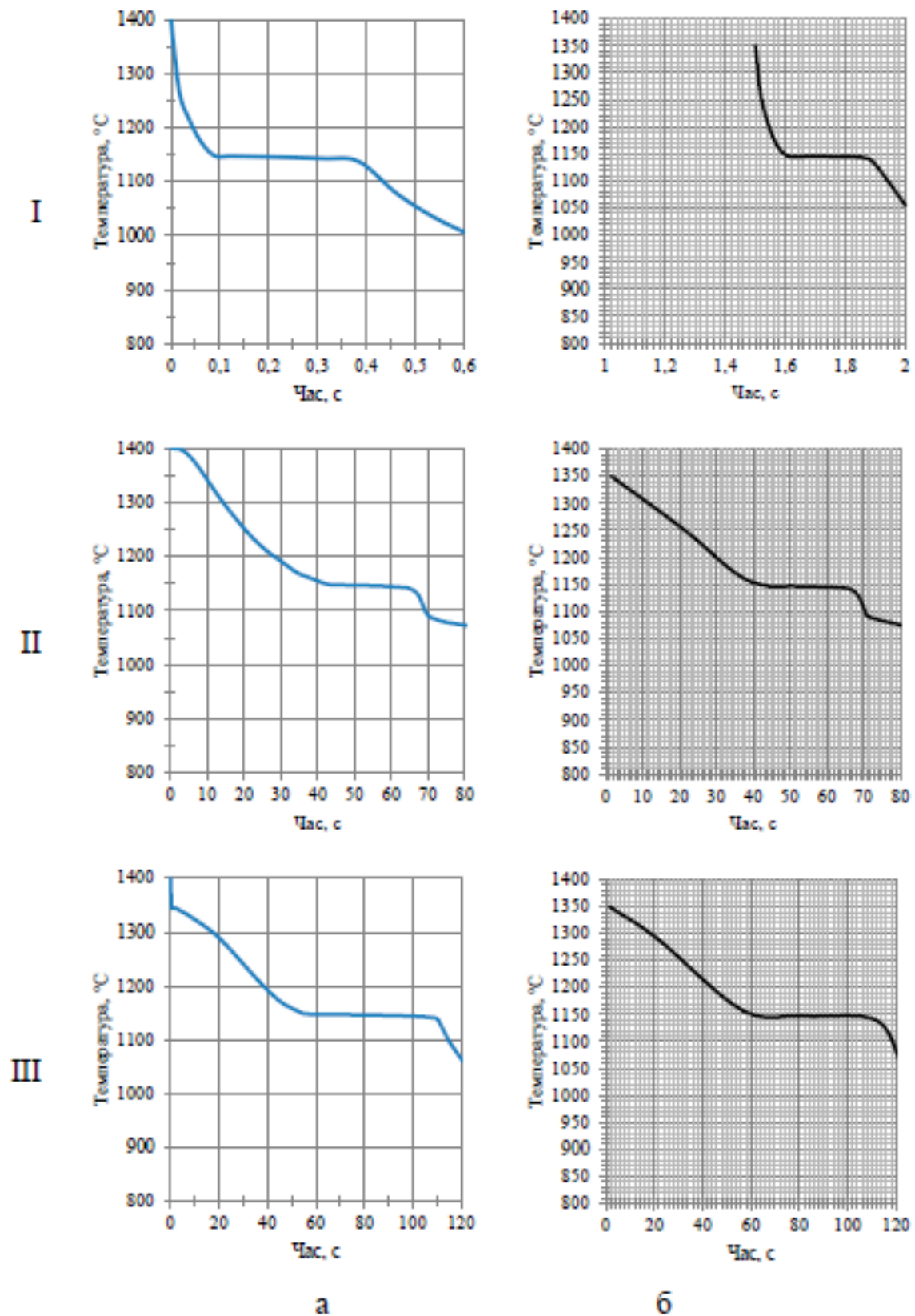


Рис. 4.34. Криві охолодження, записані за результатами моделювання (а) та натурного експерименту (б), для виливка товщиною 30 мм та зовнішнього холодильника товщиною 30 мм на мінімальній (I), середній (II) та максимальній (III) відстані від зовнішнього холодильника

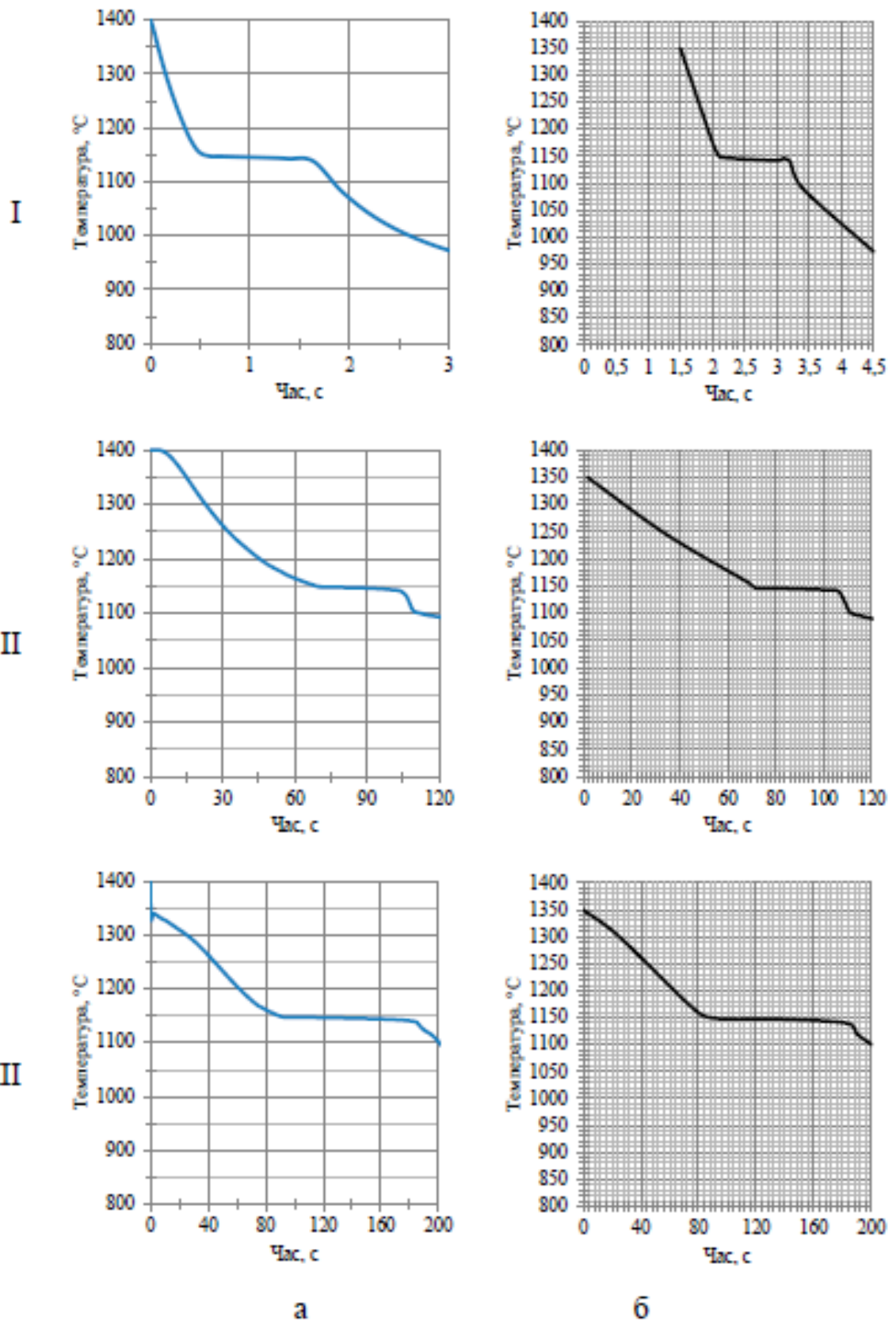


Рис. 4.35. Криві охолодження, записані за результатами моделювання (а) та натурального експерименту (б), для виливка товщиною 40 мм та зовнішнього холодильника товщиною 30 мм на мінімальній (I), середній (II) та максимальній (III) відстані від зовнішнього холодильника

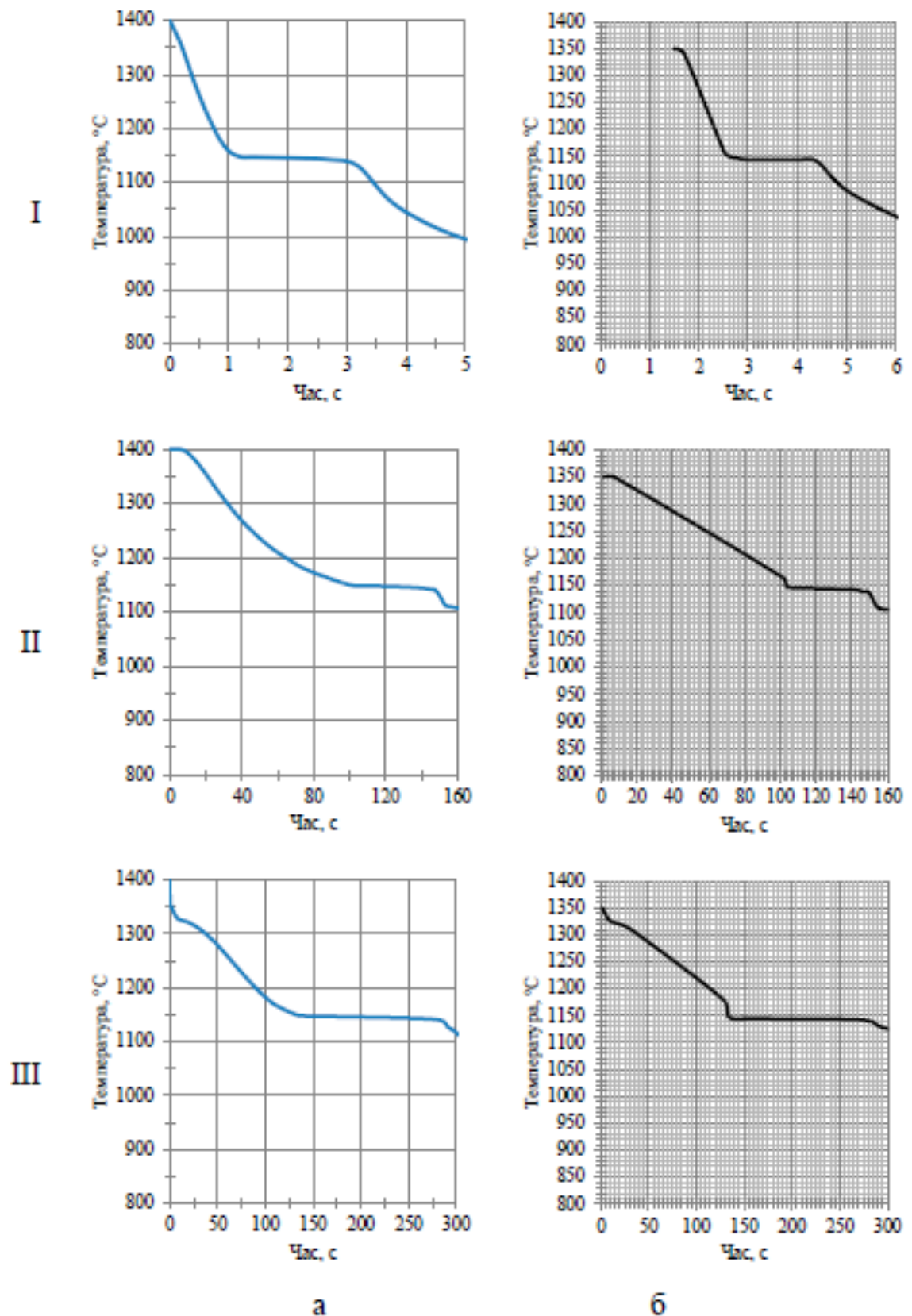
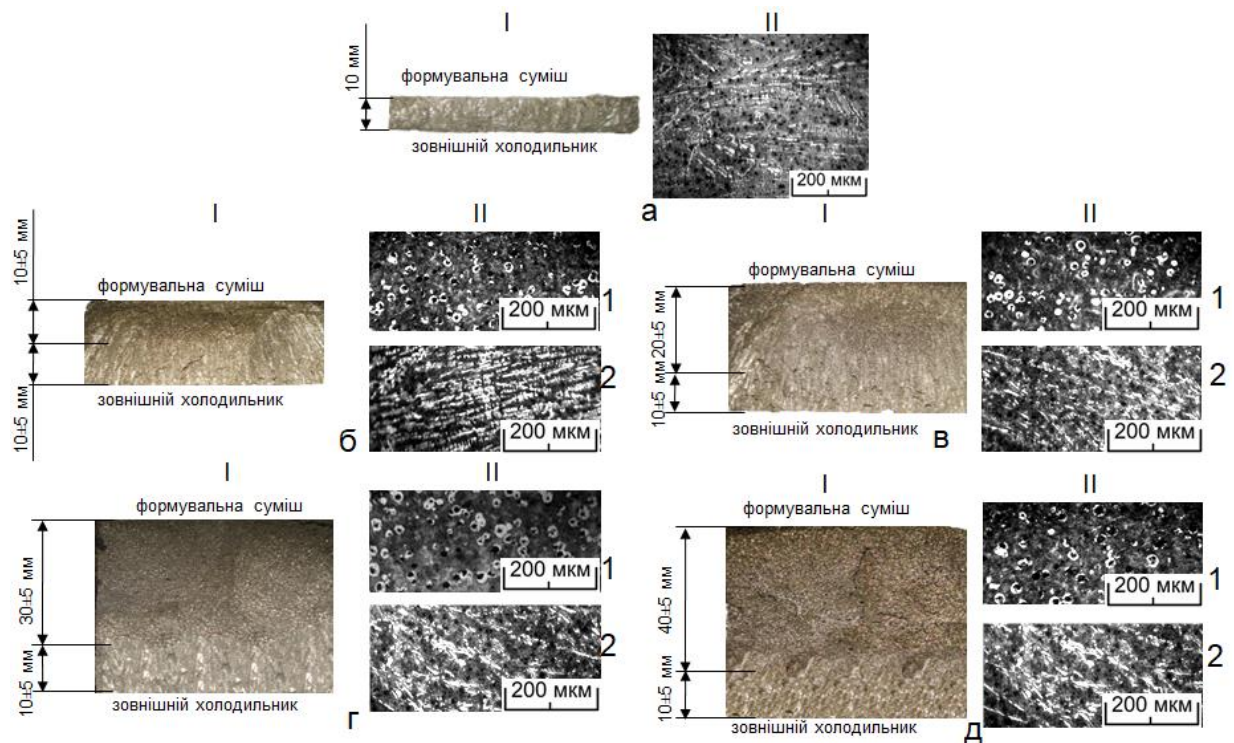


Рис. 4.36. Криві охолодження, записані за результатами моделювання (а) та натурального експерименту (б), для виливка товщиною 50 мм та зовнішнього холодильника товщиною 30 мм на мінімальній (I), середній (II) та максимальній (III) відстані від зовнішнього холодильника

Аналіз результатів досліджень показав, що після сфероїдизувального модифікування базового розплаву та заповнення ним порожнини ливарної форми з попередньо встановленим зовнішнім холодильником переріз виливка товщиною 10 мм кристалізується монолітним з наскрізним вибіленням із перліто-цементитною мікроструктурою, серед якої виділяються дрібнодисперсні включення графіту кулястої форми (рис. 4.37, а; 4.39, а).



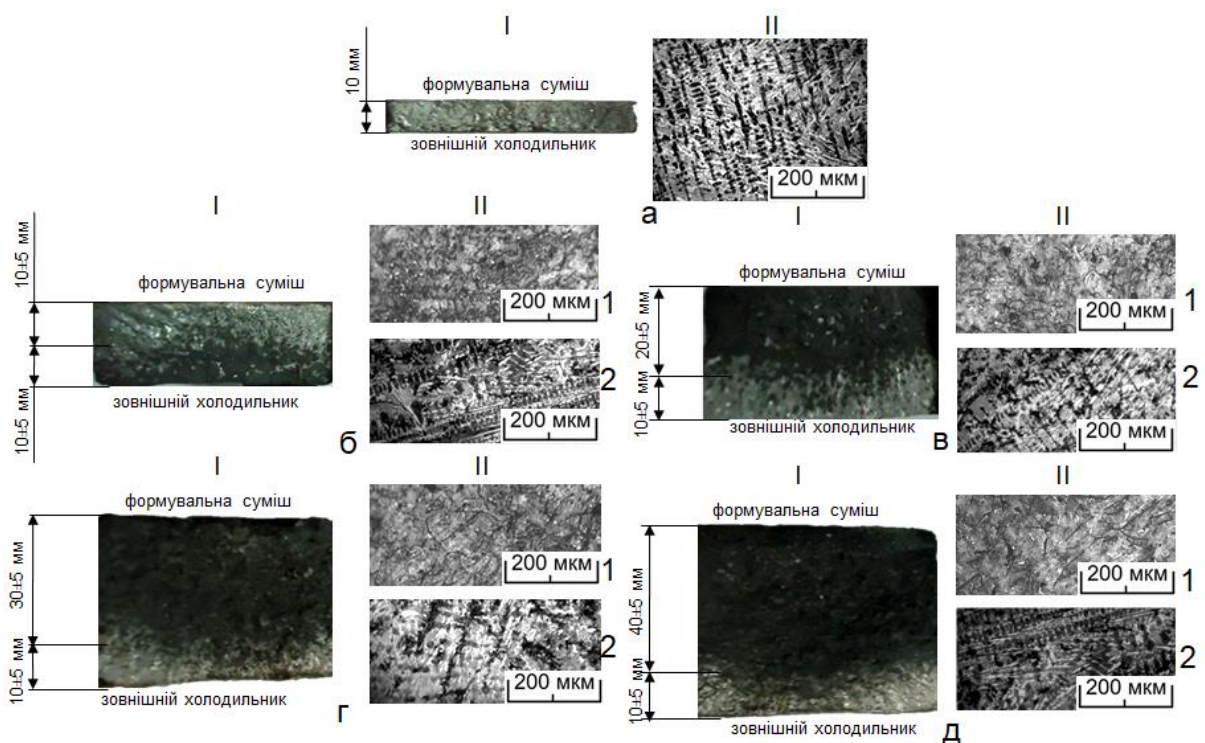
а – 10 мм; б – 20 мм; в – 30 мм; г – 40 мм; д – 50 мм. 1 – з боку зовнішнього холодильника, 2 – з боку піщано-глинястої форми

Рис. 4.37. Макроструктура зламу (I) та мікроструктура чавуну (II) в перерізах виливка із білого та високоміцного чавунів

За перерізами виливків товщиною від 20 до 50 мм спостерігається диференціація структури та властивостей між протилежними їх поверхнями (з боку зовнішнього холодильника та з боку піщано-глинястої форми). При цьому твердий зносостійкий шар виливка з боку зовнішнього холодильника з вибіленого чавуну формується товщиною 10 ± 5 мм (див. рис. 4.37). Мікроструктура вибіленого шару чавуну у виливку складається з перліту та цементиту з включеннями дрібнодисперсного графіту кулястої форми (див. рис. 4.37, б-д, I). В таких самих перерізах виливків з боку піщано-глинястої ливарної форми сплав на товщину 10-40 мм кристалізується з світло-

сірим кольором макроструктури, характерним для високоміцного чавуну. Мікроструктура чавуну складається з графіту кулястої форми в перліто-феритній металевій матриці, без евтектичних карбідів заліза (див. рис. 4.37, б-д, II).

Аналогічні результати отримано і після графітизувального модифікування, за винятком того, що замість вкраплин графіту кулястої форми у мікроструктурі виливка спостерігаються вкраплини графіту пластинчастої форми (рис. 4.38; рис. 4.39, б).



а – 10 мм; б – 20 мм; в – 30 мм; г – 40 мм; д – 50 мм. 1 – з боку зовнішнього холодильника, 2 – з боку піщано-глинястої форми

Рис. 4.38. Макроструктура зламу (I) та мікроструктура чавуну (II) в перерізах виливка із білого та сірого чавунів

Твердість поверхонь стінок виливків товщиною 10...50 мм в литому стані з боку чавунного холодильника знижується від 450 до 380 НВ за рахунок виділення включень графіту кулястої форми (рис. 4.40, а крива 1). З боку піщано-глинястої форми твердість поверхонь стінок з високоміцного чавуну знижується від 450 до 260 НВ (рис. 4.40, а крива 2) за рахунок збільшення

розміру графітових включень та долі м'якого фериту у переважно перлітній металевій матриці (рис. 4.40, а).

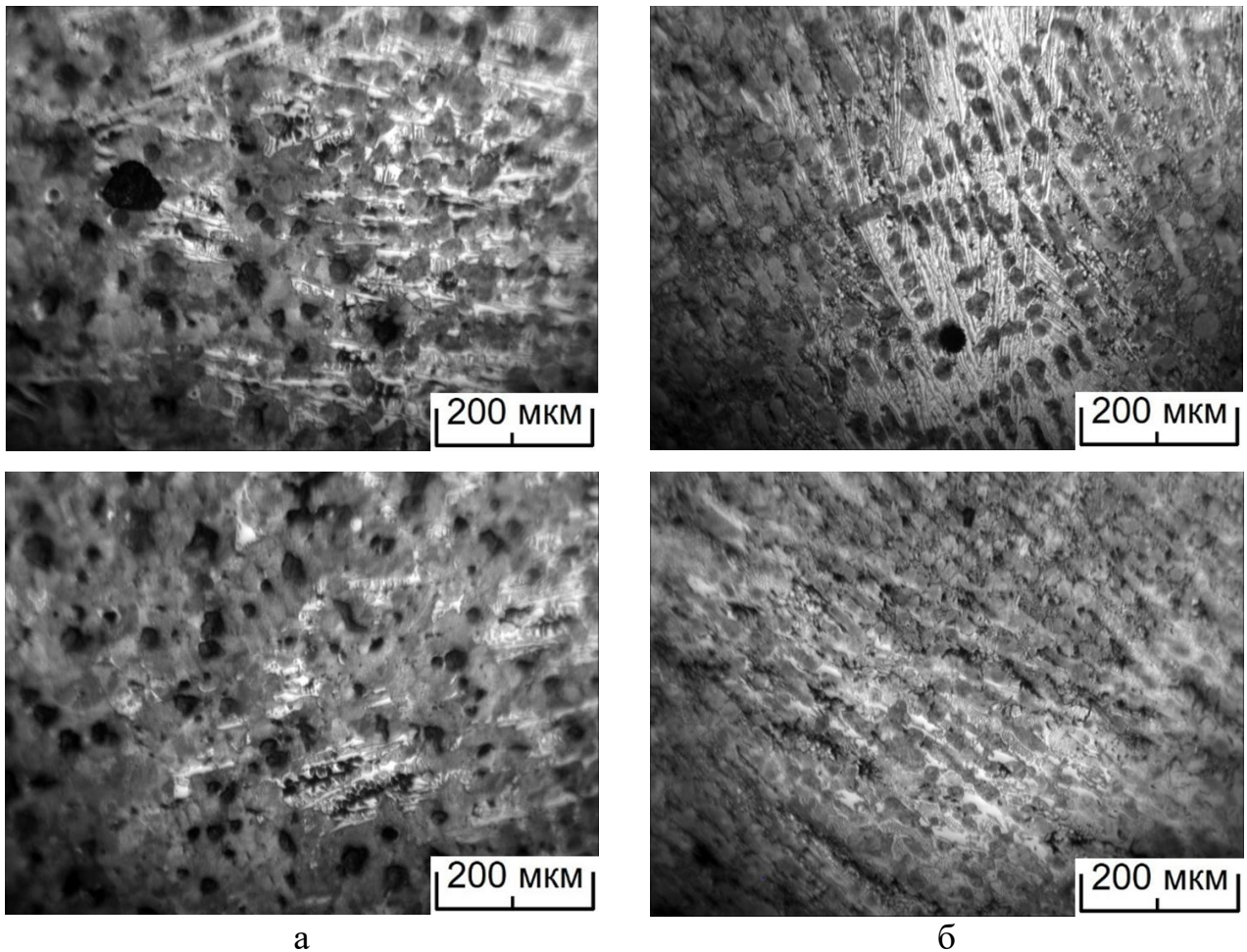
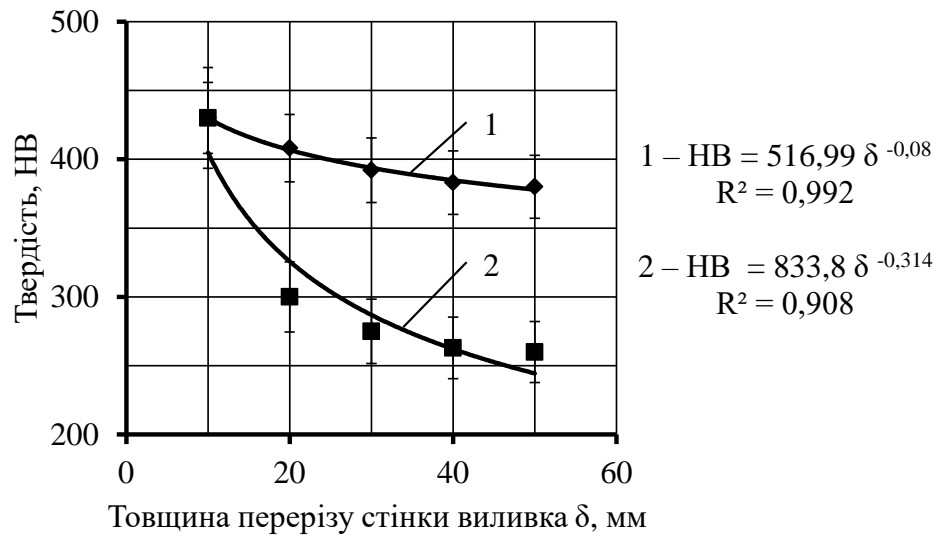
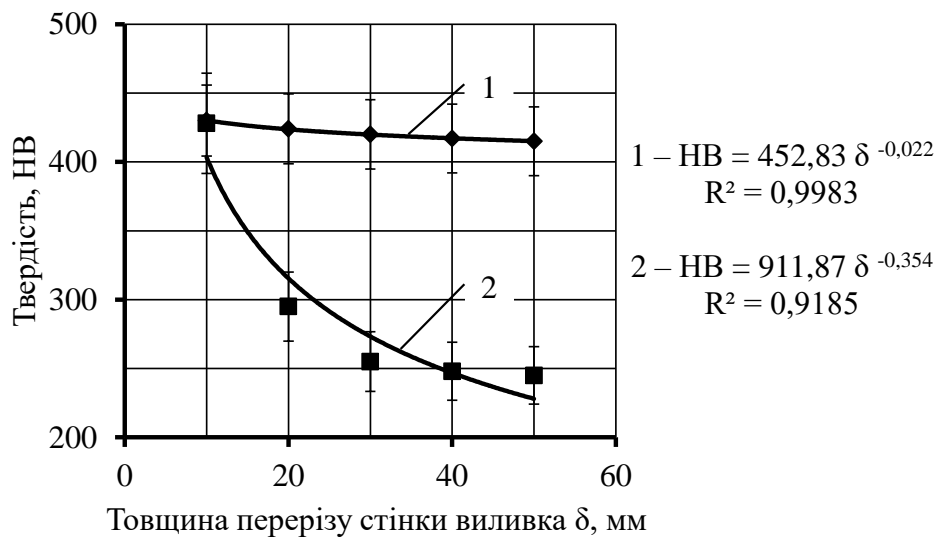


Рис. 4.39. Мікроструктури перехідних шарів двошарового виливка з поєднанням шарів: білий – високоміцний чавун (а); білий – сірий чавун (б)

Отримані експериментальні данні на натурних виливках з використанням зовнішнього холодильника товщиною 30 мм та виливків, товщинами 10, 20, 30, 40 та 50 мм, співпадають з результатами комп'ютерного моделювання, що підтверджує їх достовірність.



а



б

Рис. 4.40. Твердість поверхонь двошарових виливків з поєднанням частин БЧ-ВЧ (а), БЧ-СЧ (б)

4.3 Дослідження зносостійкості робочого шару чавунних виливків

Для робочого шару виливків, виготовлених за дослідженими технологіями, проведено визначення відносної зносостійкості. Еталоном, значення відносної зносостійкості якого прийнято за 1, обрано зразок із низьколегованого хромистого чавуну марки ЧХ3 за ГОСТ 7769-82 «Чугун

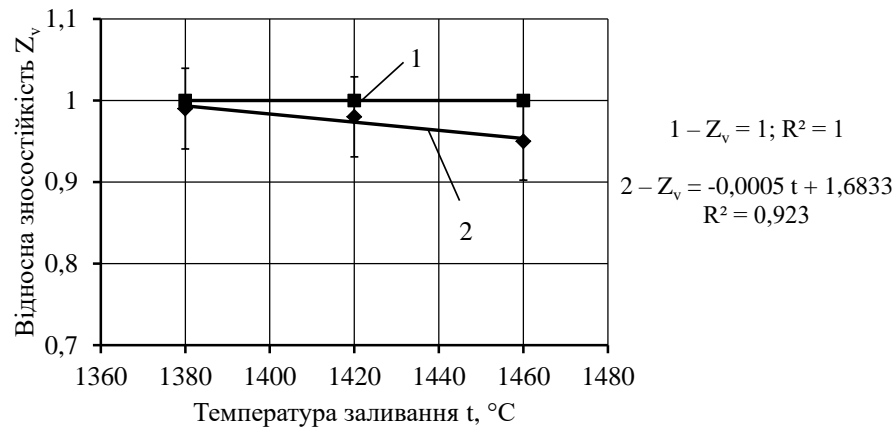
легированный для отливок со специальными свойствами. Общие технические условия». Вибір даної марки обумовлено її виробничим застосуванням в умовах зношування. Дослідження проводили на зразках у литому стані.

Аналізом результатів дослідження відносної зносостійкості робочого шару вибіленого чавуну двошарового виливка, отриманого за технологією поетапного заливання, встановлено, що його зносостійкість знаходиться на рівні зносостійкості еталонного зразка (рис. 4.41). Це пояснюється утворенням схожої структури металевої матриці та утворенням карбідів однакового цементитного (Me_3C) типу. Утворення карбідів типу Me_3C узгоджується із даними робіт [2, 118, 119] за вмісту хрому у низьколегованих чавунах від 2 до 3 %.

Збільшення температури заливання розплаву від 1380 до 1460 °C призводить до незначного зниження зносостійкості зразка, що, ймовірно, пояснюється сильнішим прогріванням частини робочого шару виливка до температур, достатніх для проходження незначної релаксації внутрішніх напружень.

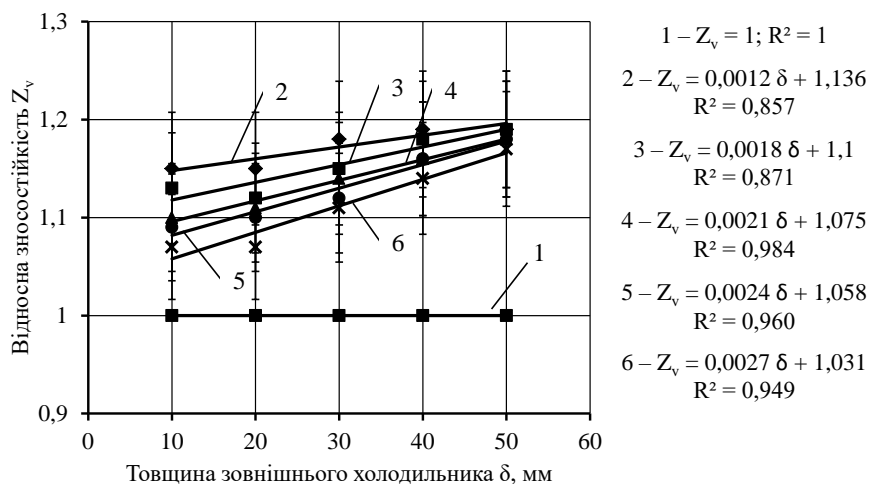
Результати визначення відносної зносостійкості зразків із виливків, отриманих за технологічним варіантом виготовлення із заливанням на зовнішній чавунний холодильник свідчать про її прямопропорційну залежність від товщини холодильника та оберненопропорційну – від товщини самого виливка у досліджених діапазонах (рис.4.42).

Підвищена на 10-20 % зносостійкість зразків у порівнянні з еталоном пояснюється орієнтацією карбідних краплин у металевій матриці у напрямку перпендикулярному до фронту кристалізації. Така просторова орієнтація структурних складових чавуну властива для виливків, кристалізація яких відбувається із підвищеною швидкістю охолодження, яка у даному випадку забезпечується застосуванням зовнішнього чавунного холодильника.



1 – еталон із хромистого чавуну; 2 – робочий шар із білого чавуну двошарового виливка

Рис. 4.41. Відносна зносостійкість робочого шару виливка, отриманого за технологічним варіантом із поетапним заливанням форми



1 – еталон із хромистого чавуну; 2 – виливок товщиною 10 мм; 3 – виливок товщиною 20 мм; 4 – виливок товщиною 30 мм; 5 – виливок товщиною 40 мм; 6 – виливок товщиною 50 мм

Рис. 4.42. Відносна зносостійкість робочого шару із білого чавуну виливків різної товщини, виготовлених за технологічним варіантом заливання на зовнішній чавунний холодильник

Висновки до розділу 4

1. Виконано моделювання технологічного процесу виготовлення двошарового чавунного вилика поетапним заливанням. За результатами моделювання встановлено час кристалізації чавунних зразків різного хімічного складу та товщини й визначено основні технологічні параметри процесу виробництва шаруватих литих деталей: температуру чавуну перед заливанням першої та другої порцій й час витримування між етапами заливання.

2. Для виготовлення якісних виливків, які працюють в умовах ударного та ударно-абразивного зношування, за технологією, сутність якої полягає в поетапному заливанні ливарної форми чавуном одного хімічного складу через незалежні ливникові системи, визначено параметри технологічного процесу внутрішньоформового модифікування чавуну: температура заливання чавуну першої порції має бути в межах від 1300 до 1350 °C, температура чавуну другої порції – від 1440 до 1460 °C, час витримування між етапами заливання – від 60 до 120 с.

3. Моделюванням процесів заливання та кристалізації із використанням зовнішнього чавунного холодильника встановлено температурно-часові параметри технологічного процесу виготовлення чавунних виливків з диференційованими властивостями, що дало змогу побудувати номограми для прогнозування глибини вибілення у виливках залежно від товщини виливка та холодильника.

4. Результати моделювання перевірено на реальних технологіях виготовлення двошарових виливків з використанням холодильника. Установлено, що твердість поверхонь виливків товщиною 10-50 мм у литому стані з боку чавунного холодильника знижується від 450 до 380 НВ через виокремлення вкраплень графіту кулястої форми, а з боку піщано-глинястої форми – від 450 до 260 НВ через збільшення розміру графітових вкраплень і частки фериту в перлітній металевій матриці.

5. Аналізом результатів дослідження відносної зносостійкості робочого шару вибіленого чавуну двошарового виливка, виготовленого за технологією поетапного заливання ливарної форми встановлено, що його зносостійкість знаходиться на рівні зносостійкості еталонного зразка, виготовленого із зносостійкого чавуну ЧХЗ, а відносна зносостійкість зразків, виготовлених за технологічним варіантом використання зовнішнього чавунного холодильника, знаходиться в прямо пропорційній залежності від товщини холодильника та обернено пропорційній – від товщини стінки виливка.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. За результатами дослідження впливу вуглецю та кремнію на структуроутворення в чавунних виливках з різною товщиною їх перерізів для подальших досліджень визначено такі чавуни: схильний до кристалізації за метастабільною діаграмою хімічного складу, мас. %: C = 2,8-3,0; Si = 0,45-0,50; Mn = 0,4-0,6; P – до 0,12; S – до 0,02; решта залізо з вуглецевим еквівалентом $C_e = 2,94-3,15$ % й схильний до кристалізації за стабільною діаграмою хімічного складу, мас. %: C = 3,4-3,6; Si = 2,2-2,4; Mn = 0,4-0,6; P – до 0,12; S – до 0,02; решта залізо з вуглецевим еквівалентом $C_e = 4,13-4,4$ %. Установлено, що для внутрішньоформового графітизувального модифікування необхідно використовувати феросиліцій ФС75 розміром фракцій 1-5 мм у кількості 2 % від маси розплаву, який піддають обробленню, а для сфероїдизувального – феросилікомагнієвий модифікатор ФСМг7 тих же фракцій і кількості.

2. Установлено, що застосування внутрішньоформового модифікування для отримання вибіленого та графітизованого чавунів на відміну від ковшового забезпечує формування необхідних структур у чавунних виливках, сприяє стабільній кристалізації металу в тонких перерізах вилівка без вибілення на відміну від ковшового модифікування. Доказано, що за однакового хімічного складу вихідних чавунів у литому стані мають місце суттєві відмінності в мікроструктурі, що змінює механічні властивості металу в перерізах ступінчастих проб, особливо в перерізах товщиною 5, 10 і 20 мм.

3. За результатами моделювання встановлено час кристалізації чавунних виливків різного хімічного складу та товщини й визначено основні технологічні параметри процесу виробництва шаруватих литих деталей поетапним заливанням ливарної форми: температура заливання першого шару має бути в межах від 1300 до 1350 °C; температура доливання другого шару – від 1440 до 1460 °C; час витримання між етапами заливання – від 60 до 120 с.

4. Визначено закономірності формування мікроструктури в перехідній зоні двошарових чавунних виливків, виготовлених способом послідовного

залиття через незалежні ливникові системи. Установлено, що в мікроструктурі перехідної зони можливе формування половинчастого чавуну, мікроструктуру якого складають вкраплення пластинчастого графіту та цементиту в перлітній металевій матриці для виливків з поєднанням шарів білого та сірого чавунів, а для виливків з поєднанням шарів білого та високоміцного чавунів – вкраплення кулястого та вермикулярного графіту й цементиту в перлітній металевій матриці.

5. Вперше встановлено залежності між температурами залиття розплаву та часом витримання між залиттям і розмірами перехідних шарів у двошарових чавунних виливках товщиною до 50 мм. Показано, що при зменшенні температури залиття розплаву від 1460 до 1380 °С та збільшенні часу витримання між залиттям від 3 до 480 с товщина перехідного шару у виливках, які виготовлено послідовним залиттям через незалежні ливникові системи вихідного розплаву чавуну та його внутрішньоформового модифікування, зменшується з 1,0 до 0,01 мм.

6. Моделюванням процесів залиття розплавів у форму та їх кристалізації з використанням зовнішнього чавунного холодильника встановлено температурно-часові параметри технологічного процесу виготовлення чавунних виливків з диференційованими властивостями, що дало змогу побудувати номограми для прогнозування глибини вибілення у виливках залежно від товщини стінок виливка та холодильника. Результати моделювання перевірено на реальних технологіях виготовлення двошарових виливків і встановлено, що твердість поверхонь виливків товщиною 10-50 мм у литому стані з боку чавунного холодильника знижується від 450 до 380 НВ через виокремлення вкраплень графіту кулястої форми, а з боку піщано-глинястої форми – від 450 до 260 НВ через збільшення розміру графітових вкраплень і частки фериту в перлітній металевій матриці.

7. Вперше одержано залежності впливу товщини зовнішнього чавунного холодильника та товщини виливка на глибину вибіленого шару в двошарових чавунних виливках масою до 10 кг. Установлено, що мінімальна глибина

вибілення 1,5 мм забезпечується під час застосування холодильника товщиною 10 мм у виливку товщиною 50 мм, а максимальна – 14,9 мм із холодильником товщиною 50 мм у виливку товщиною 20 мм. Побудовано номограми для прогнозування глибини вибілення робочого шару чавунного виливка за рахунок підбору відповідних геометричних параметрів зовнішнього чавунного холодильника та виливка.

8. Установлено, що зносостійкість робочого шару вибіленого чавуну двошарового виливка, виготовленого за технологією поетапного заливання ливарної форми знаходиться на рівні зносостійкості еталонного зразка, виготовленого із зносостійкого чавуну ЧХЗ, а зносостійкість робочого шару зразків, виготовлених за технологічним варіантом використання зовнішнього чавунного холодильника, на 10-20 % вища в порівнянні з еталонним зразком й знаходиться в прямо пропорційній залежності від товщини холодильника та обернено пропорційній – від товщини стінки виливка.

9. Розроблено та успішно апробовано технології виготовлення двошарових чавунних виливків в умовах ливарної лабораторії промислового типу та на підприємствах України (Додаток А).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Костенко Г. Д. Исследование процессов затвердевания биметаллических отливок на основе сплавов железа / Г. Д. Костенко, В. И. Легенчук, С. А. Болгар и др. // Процессы литья. – 1998. – № 3-4. – С. 58-63.
2. Гарбер М. Е. Износостойкие белые чугуны: свойства, структура, технология, эксплуатация / М. Е. Гарбер. – М. : Машиностроение, 2010. – 280 с.
3. Zhu Y. C. Analysis of heat transport and thickness of bimetal composition layer between low-alloy steel and high-chromium white cast iron / Y. C. Zhu, Z. J. Wei, S. F. Rong, X. Y. Li, X. L. Duan // Materials Research Innovations. – 2015. – Т. 19. – Р. 561-565.
4. Xiao X. F. High Cr white cast iron/carbon steel bimetal liner by lost foam casting with liquid-liquid composite process / X. F. Xiao, S. P. Ye, W. X. Yin // China Foundry. – 2012. – Т. 2, № 9. – Р. 136-142.
5. Xiong B. Effect of volume ratio of liquid to solid on the interfacial microstructure and mechanical properties of high chromium cast iron and medium carbon steel bimetal / B. Xiong, C. Cai, B. Lu // Journal of Alloys and Compounds. – 2011. – Т. 509. – Р. 6700-6704.
6. Rong S. F. Influence of casting technique on the mechanical properties of bimetal composites / S. F. Rong // Journal of Iron and Steel Research International. – 2011. – Т. 18. – Р. 546-549.
7. A Modern casting staff report. Census of world casting production: global casting production expands / A Modern casting staff report // Modern casting. – 2018. – № 12. – Р. 23-26.
8. Ширяев В. В. Технологические особенности производства биметаллических (многослойных) отливок повышенной износостойкости / В. В. Ширяев, О. А. Пеликан, И. О. Шинский, Д. В. Глушков, Ю. Н. Романенко // Металл и литье Украины. – 2009. – № 7-8. – С. 52-56.

9. Каричковский П. Н. Способы повышения технического ресурса, эксплуатационной надежности рабочих органов дробильно-размольного оборудования / П. Н. Каричковский, И. О. Шинский, Л. М. Клименко // Металл и литье Украины. – 2009. – № 7-8. – С. 56-60.

10. Чепурко М. И. Биметаллические материалы / М. И. Чепурко, В. Я. Остренко, Л. Я. Глушкин, Б. И. Бережко, А. М. Буйновский, Е. А. Резников, Б. Д. Пелюхов, А. Н. Краснов, В. П. Коновалов. – Л. : Судостроение, 1984. – 272 с.

11. Дмитриев Л. Н. Биметаллы / Л. Н. Дмитриев, Е. В. Кузнецов, А. Г. Кобелев, Ю. П. Чегодаев, В. Е. Шкляев, В. А. Войцеховский. – Пермь. : Пермское книжное издательство, 1991. – 416 с.

12. Скляр В. А. Инновационные и ресурсосберегающие технологии в металлургии : учеб. пос. / В. А. Скляр. – Донецк : ДонНТУ, 2014. – 224 с.

13. Пат. 9304 UA, МПК 7C22C37/06,37/10. Синтетичний низьколегований зносостійкий чавун для відцентрового лиття двошарових заготовок борошномельних вальців / Костенко Г. Д., Суржигов А. Ф., Пелікан О. А., Костенко Д. Г., Каричковський П. М. – Опубл. 15.09.2005. – Бюл. № 9, 2005.

14. Kambakas K. Solidification of high-Cr white cast iron–WC particle reinforced composites / K. Kambakas, P. Tsakiroopoulos // Materials Science and Engineering A. – 2005. – № 413-414. – P. 538-544.

15. Christopher D. Bi metallic pipe / D. Christopher // Mechanical engineering. –1961. – Т. 83, № 6. – С. 68-71.

16. Астров Е. И. Плакированные многослойные металлы / Е. И. Астров. – М. : Металлургия, 1965. – 239 с.

17. Верховлюк А. М. Взаимодействие жидких и твердых фаз в металлургических процессах / А. М. Верховлюк. – К. : Наукова думка, 2014. – 168 с.

18. Лакедемонский А. В. Биметаллические отливки / А. В. Лакедемонский. – М. : Машиностроение, 1964. – 180 с.

19. Зимон А. Д. Адгезия жидкости и смачивание / А. Д. Зимон. – М. : Химия, 1974. – 416 с.
20. Быковский О. Г. Влияние состояния поверхности твердого тела на характеристики смачивания его расплавом / О. Г. Быковский, В. Е. Самойлов, В. Е. Ольшанецкий, А. Н. Лаптева, А. В. Бусов, Д. Я. Воронин // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2013. – № 2. – С. 56-60.
21. Ниженко В. И. Поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов / В. И. Ниженко, Л. И. Флока. – М. :Металлургия, 1981. – 208 с.
22. Создание и развитие научных основ и технологий получения биметаллических отливок на основе железоуглеродистых сплавов в Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа до ресурсу: <http://buymore.pro/article/litejnoe-proizvodstvo/533/sozdanie-razvitie-nauchnyh-osnov-tehnologij-polucheniya-bimetallicheskih-otlivok>.
23. Позняк Л. А. Основные направления производства литых биметаллов / Л. А. Позняк, Г. Д. Костенко, А. А. Снежко // В сб. : Литые биметаллических изделий. – К. : ИПЛ АН УССР, 1976. – С. 3-15.
24. Ясногородский В. И. Биметаллические втулки трехпоршневых буровых насосов / В. И. Ясногородский, Н. Ш. Шадров, В. А. Лаптев // В сб. : Состояние и перспективы развития биметаллического и многослойного литья. – К. : АН УССР ИПЛ, 1991 – С. 34-38.
25. Шевченко А. И. Производство центробежнолитых однослойных и биметаллических труб и заготовок с использованием синтетического шлака / А. И. Шевченко, В. А. Ефимов, А. И. Семененко, Б. Б. Конопелько // В сб. : Многослойное литье. – К. : ИПЛ АН УССР, 1970. – С. 159-171.
26. Костенко Г. Д. Некоторые свойства защитных покрытий на основе синтетических боратных шлаков / Г. Д. Костенко, Е. И. Фрумин // В сб. : Литые биметаллических изделий. – К. : ИПЛ АН УССР, 1976. – С. 16-26.

27. Костенко Г. Д. Формирование переходного слоя в биметаллических отливках сталь-чугун / Г. Д. Костенко, А. А. Снежко, В. И. Ульшин // В сб. : Литье биметаллических изделий. – К. : ИПЛ АН УССР, 1976. – С. 26-32.
28. Wróbel T. Bimetallic layered castings alloy steel – grey cast iron / T. Wróbel // Archives of Materials Science and Engineering. – 2011. – Т. 48, № 2. – P. 118-125.
29. Cholewa M. Bimetallic layer castings / M. Cholewa, T. Wróbel, S. Tenerowicz // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2010. – Т. 43, № 1. – P. 385-392.
30. Кривоносова Е. А. Пайка металлов / Е. А. Кривоносова. – Пермь : Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2012. – 216 с.
31. Лашко С. В. Технология пайки изделий в машиностроении / С. В. Лашко, Е. И. Врублевский. – М. : Машиностроение, 1993. – 464 с.
32. Пацкевич И. Р. Поверхностные явления при сварке металлов / И. Р. Пацкевич, В. Р. Рябов. – К. : Наукова думка, 1991. – 240 с.
33. Сварочные материалы для дуговой сварки. Защитные газы и сварочные флюсы : В 2 т. :Т.1 / Б. П. Конищев, С. А. Курланов, Н. Н. Потапов, В. Д. Ходаков. – М. : Машиностроение, 1989. – 544 с.
34. Фрумин Е. И. Нагрев стали в синтетических шлаках / Е. И. Фрумин. –К. : Техніка, 1973. – 130 с.
35. Костенко Г. Д. Гидродинамические особенности процессов получения биметаллических отливок / Г. Д. Костенко, О. А. Пеликан, Ю. Н. Романенко, Д. Г. Костенко // Процессы литья. – 2006. – № 1. – С. 69-73.
36. Посыпайко И. Ю. Повышение износостойкости сменных деталей промышленных смесителей / И. Ю. Посыпайко, О. В. Соценко // Металл и литье Украины. – 2011. – № 1 (212). – С. 32-35.
37. Кириевский Б. А. Получение моно- и биметаллических отливок намораживанием из расплава / Б. А. Кириевский, Е. Н. Александрова // Процессы литья. – 2012. – № 5 (95). – С. 61-67.

38. Кириевский Б. А. К вопросу растворения ферросплава в железоуглеродистых расплавах / Б. А. Кириевский // Процессы литья. – 1992. – № 3. – С. 11-20.
39. Ефименко Л. П. Растворение железа в расплаве Ni-B / Л. П. Ефименко // Металлы. – 1992. – № 2. – С. 216-219.
40. Натонзон Я. В. Растворимость и кинетика растворения вольфрама в жидком никеле при 1525 °С / Я. В. Натонзон, В. П. Титов, Р. В. Антонченко // Порошковая металлургия. – 1992. – № 2. – С. 73-77.
41. Суменкова В. В. Исследование процесса растворения сфероидизирующих лигатур в чугунах / В. В. Суменкова, И. В. Корниец // Процессы литья. – 1993. – № 4. – С. 11-14.
42. Orozco K. M. Experimental study and thermodynamic computational simulation of phase transformations in centrifugal casting bimetallic pipe of API 5LX65Q steel and Inconel 625 alloy / K. M. Orozco, J. G. Dessi, C. R. Moreira Afonso, J. M. Meza, J. Unfried-Silgado // Journal of Manufacturing Processes. – 2018. – № 32. – P 318-326.
43. Лузан П. П. Технологические особенности изготовления крупных базовых станочных отливок методом двухслойной заливки / П. П. Лузан, В. Г. Горенко, В. Т. Шульга, И. Г. Раздобарин // В сб. : Многослойное литье. – К. : ИПЛ АН УССР, 1970. – С. 113-133.
44. Фурман Е. Л. Биметаллические отливки чугуна-алюминия / Е. Л. Фурман, С. П. Казанцев, А. С. Тактуев // Литейщик России. – 2005. – № 9. – С. 7-10.
45. Jiang W. Improved steel/aluminum bonding in bimetallic castings by a compound casting process / W. Jiang, Z. Fan, C. Li // Journal of Materials Processing Technology. – 2015. – № 226. – P. 25-31.
46. Hua W. Study on bimetal compound casting technology of hammers / W. Hua // Advanced Materials Research. – 2012. – T. 535-537. – С. 566-570.
47. Jura S. Compound castings of steel and cast iron / S. Jura, J. Suchon // Solidification of Metals and Alloys. – 1995. – № 24. – P. 67-70.

48. Bartocha D. Compound castings / D. Bartocha, J. Suchon, S. Jura. // Solidification of Metals and Alloys. – 1998. – № 38. – P. 151-156.
49. Wróbel T. Examples of material solutions in bimetallic layered castings / T. Wróbel, M. Cholewa, S. Tenerowicz // Archives of foundry engineering. – 2011. – T. 11, № 3. – P. 11-16.
50. Rong S. F. Study on coated–liquid–liquid trimetal composite casting hammer / S. F. Rong, X. M. Zhao, H. T. Zhou, J. F. Wang, J. Yao, C. H. Li // Materials Research Innovations. – 2014. – T. 18. – P. 316-322.
51. Xiaofeng X. High Cr white cast iron/carbon steel bimetal liner by lost foam casting with liquid-liquid composite process / X. Xiaofeng, Y. Shengping, Y. Weixin, Z. Xiaoguang, X. Qiong // China foundry. – 2012. – T. 9, № 2. – P. 136-142.
52. Zic S. Possibilities of implementing bimetallic hammer castings in crushing industries / S. Zic, I. Dzambas, M. Ikonc // Metalurgija. – 2009. – T. 48, № 1. – P. 51-54.
53. Wei N. Effect of pouring temperature on the microstructure of HCCI/steel composite hammer / N. Wei, K. Wang, X. Zhou, Q. Wang, Q. Liu, J. He // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – T. 217-219. – P. 110-113.
54. Bian W. Research and application of dual liquid bimetal composite casting hammer / W. Bian, S. Rong, Y. Zhu, H. Zhou // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – T. 271-272. – P. 268-271.
55. Yang P. New type of bimetal composite casting and welding connection square hammer / P. Yang, S. Rong, X. Zhao, Y. Zhu, Y. Wu, X. Li // International Conference on Materials, Environmental and Biological Engineering (28-30 March, 2015). – Guilin : Atlantis Press, 2015. – P. 153-157.
56. Liu H. Study on diagonal hammer of three kind metals composite casting with block protecting handle / H. Liu, S. Rong, Y. Wu, P. Yang, X. Duan, Y. Zhu // MATEC Web of Conferences (11-12 June, 2016). – Hong Kong : EDP Sciences, 2016. – P. 300-304.

57. Zhu Y. C. Analysis of heat transport and thickness of bimetal composition layer between low-alloy steel and high-chromium white cast iron / Y. C. Zhu, Z. J. Wei, S. F. Rong, X. Y. Li, X. L. Duan // *Materials Research Innovations*. – 2015. – T. 19. – P. 561-565.

58. Zhu Y. Formation mechanism of bimetal composite layer between LCS and HCCI / Y. Zhu, Z. Wei, S. Rong, H. Wang, C. Zou // *China foundry*. – 2016. – T. 13, № 6. – P. 396-401.

59. Ващенко К. И. Плавка и внепечная обработка чугуна для отливок : учеб. Пособие / К. И. Ващенко, В. С. Шумихин. – К. : Вища школа, 1992. – 246 с.

60. Чугун : справочное издание / А. Д. Шерман, А. А. Жуков, Э. В. Абдулаев и др. ; под ред. А. Д. Шермана и А. А. Жукова. – М. : Металлургия, 1991. – 576 с.

61. Литовка В. И. Повышение качества высокопрочного чугуна в отливках / В. И. Литовка. – К. : Наукова думка, 1987. – 208 с.

62. Справочник по чугунному литью. 3е издание, переработанное и дополненное / Под ред. Н. Г. Гиршовича. – Ленинград : Машиностроение, 1978. – 758 с.

63. Иванов В. Г. Вплив умов плавки та газонасиченості на формоутворення графіту в чавунах / В. Г. Иванов // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2018. – № 1. – С. 16-20.

64. Иванов В. Г. Оцінка морфології включень графіту у високоміцних чавунах за допомогою фрактальної розмірності / В. Г. Иванов // *Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ»*. – 2016. – № 53. – С. 57-62.

65. Csenka J. M. Ductile Iron Trends: reducing costs, improving quality / J. M. Csonka and others // *Modern casting*. – 2002. – № 5. – P. 27-29.

66. Lerner Y. S. Magnesium Treatments in Ductile Iron Production – Part 1 / Y. S. Lerner, G. V. Panteleev // *Foundry Management and Technology*. – 2002. – T. 130, № 8. – P. 25-31.

67. Cabanne P. M. Fluctuations in magnesium treatment of ductile iron. Some reasons. Some solutions / P. M. Cabanne // Foundry. – 2011. – № 5. – P. 33-36.
68. Іванов В. Г. Розподіл магнію у синтетичному високоміцному чавуні / В. Г. Іванов // Металургія. – 2016. – № 2 (36). – С. 5-9.
69. Olawale J. O. Processing Techniques and Productions of Ductile Iron: A Review / J. O. Olawale, S. A. Ibitoye, K. M. Oluwasegun // International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2016. – Т. 7, № 9. – P. 397-423.
70. Soinski M. S. Cast iron spheroidization by plunging method and cored wire method / M. S. Soinski, A. Wachowski // Archives of foundry engineering. – 2009. – Т. 9, № 1. – P. 199-202.
71. Lerner Y. S. Iron Inoculation: An Overview of Methods / Y. S. Lerner, M. V. Riabov // Modern casting. – 1999. – № 6. – P. 37-41.
72. Remondino M. Inoculation and Spheroidising Treatments Directly Inside the Mold / M. Remondino, F. Pilastro // Modern Casting. – 1974. – v. 64. – №10. – P. 49-51.
73. Ващенко К. И. Выбор смесей и лигатур для сфероидизирующего модифицирования чугуна в форме / К. И. Ващенко, В. А. Косячков, Г. И. Кошовник [и др.] // Литейное производство. – 1977. – №7. – С. 11-13.
74. Бубликов В. Б. Межфазовое взаимодействие при внутриформенном модифицировании чугуна / В. Б. Бубликов // Процессы литья. – 1997. – №3. – С. 39-48.
75. Бубликов В. Б. Высокопрочному чугуну – 60 / В. Б. Бубликов // Литейное производство. – 2008. – №11. – С. 2-8.
76. Pokusová M. Gating system for in-mold technology / M. Pokusová, M. Murgaš // Archives of foundry. – 2006. – Т. 6, № 18. – С. 21-26.
77. Lerner Y. S. Magnesium Treatments in Ductile Iron Production – Part 2 / Y. S. Lerner, G. V. Panteleev // Foundry Management and Technology. – 2003. – Т. 131, № 2. – P. 24-29

78. Bublikov V. B. Mg7-FeSi Alloy Dissolution Kinetics in the In-Mould Process / V. B. Bublikov, Y. D. Bachinskyi, D. N. Berchuk, A. A. Yasinskyi., E. P. Nesteruk // Key Engineering Materials. – 2011. –Т. 457. – Р. 476-480.

79. Бубликов В. Б. Влияние содержания кремния и скорости охлаждения на образование отбела в отливках из модифицированного в ковше высокопрочного чугуна / В. Б. Бубликов, А. А. Ясинский, Л. Н. Сыропоршнев и др. / Процессы литья. – 2009. – № 4. – С. 17-24.

80. Бубликов В. Б. Особенности влияния кремния на структуру и механические свойства отливок из высокопрочного чугуна, модифицированного в литейной форме / В. Б. Бубликов, А. А. Ясинский, Д. Н. Берчук и др. // Процессы литья. – 2011. – № 6. – С. 28-38.

81. Бачинський Ю. Д. Вплив процесу модифікування в передкристалізаційному періоді на структуроутворення і властивості тонкостінних виробів з високоміцного чавуну : дис. канд. техн. наук : 05.16.04 / Бачинський Ю. Д. – Київ, 2017. – 176 с.

82. Нестерук Е. П. Повышение эффективности модифицирования в проточных реакторах литниковых систем и процесс изготовления отливок из высокопрочного чугуна : дис. канд. техн. наук : 05.16.04 / Нестерук Е. П. – Киев, 2016. – 135 с.

83. Фесенко М. А. Диференціація властивостей частин виливка модифікуванням чавуну в ливарній формі : дис. канд. техн. наук : 05.16.04 / Фесенко М. А. – Київ, 2007. – 160 с.

84. Фесенко К. В. Модифікування чавуну в ливниковій системі для виробництва двошарових виливків : дис. канд. техн. наук : 05.16.04 / Фесенко К. В. – Київ, 2016. – 153 с.

85. Бубликов В. Б. Влияние модификаторов при внутриформенном графитизирующем модифицировании на структуру высокопрочного чугуна / В. Б. Бубликов, Д. Н. Берчук, Ю. Д. Бачинский и др. // Металл и литье Украины. – 2014. – № 8(255). – С. 6-11.

86. Stefański Z. Comparing the Effectiveness of Cast Iron Spheroidization by the Traditional Method and Using a Reaction Chamber (Reactor) Placed in Foundry Mould / Z. Stefański, J. Kamińska, E. Pamuła, M. Angrecki, A. Palma // Archives of foundry engineering. – 2018. – Т. 18, № 1. – Р. 191-195.

87. Ковалевич Е. В. Способы модифицирования чугуна для получения шаровидной формы графита / Е. В. Ковалевич // Литейное производство. – 2006. – №4. – С. 9-14.

88. Косячков В. А. Особенности технологии получения высокопрочного чугуна модифицированием в форме / В. А. Косячков, К. И. Ващенко // Литейное производство. – 1975. – № 12. – С. 11-12.

89. Косячков В. О. Сфероидизирующее модифицирование чугуна в литейной форме : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.16.04 "ливарне виробництво" / Косячков В. О. – Київ, 1978. – 20 с.

90. Макаревич А. П. Влияние способа ввода модификатора на структуру высокопрочного чугуна А. П. Макаревич, А. Н. Фесенко, М. А. Фесенко / Литейное производство. – 2004. – № 9. – С. 3-6.

91. Косячков В. А. Влияние метода модифицирования на свойства высокопрочного чугуна / В. А. Косячков, К. И. Ващенко, Л. Н. Сыропоршнев // Литейное производство. – 1982. – № 9. – С. 6-7.

92. Stawarz M. Selected Phenomena of the In-Mold Nodularization Process of Cast Iron That Influence the Quality of Cast Machine Parts / M. Stawarz, K. Janerka, M. Dojka // Processes. – 2017. – Т. 68, № 5. – С. 46-54.

93. Иванов В. Г. Вплив сірки на морфологію графіту в чавунах / В. Г. Иванов, В. П. Пірожкова, В. В. Луньов // Металургія. – 2017. – № 2 (38). – С. 14-19.

94. Бубликов В. Б. Влияние технологических факторов на формирование структуры тонкостенных отливок из высокопрочного чугуна, получаемого внутриформенным модифицированием / В. Б. Бубликов, Д. Н. Берчук, А. А. Ясинский и др. // Процессы литья. – 2011. – № 3(87). – С. 34-44.

95. Фесенко М. А. Новые технологии изготовления отливок модифицированием чугуна в литейной форме / М. А. Фесенко // Металл и литье Украины. – 2014. – № 11(258). – С. 10-16.

96. Juretzko F. R. A New Modified In-Mold treatment of Ductile Iron Production Using a Direct-Pour Container Technique / F. R. Juretzko, J. Hitchings, D. M. Stefanescu // American Foundry Society. – 2007. – № 4. – P. 152-162.

97. Pietrowski S. Influence of reaction chamber shape on cast-iron spheroidization process in-mold / S. Pietrowski // Archives of foundry engineering. – 2010. – Т. 10, № 1. – P. 115-122.

98. Бубликов В. Б. Переход магния в металл отливок при внутриформенном модифицировании в прямоточном и центробежном реакторах / В. Б. Бубликов, Е. П. Нестерук, Ю. Д. Бачинский, Д. Н. Берчук // Литейное производство. – 2013. – № 11. – С. 21-24.

99. Zar Myint M. T. Study on the Effect of Weight Percentage Variation and Size Variation of Magnesium Ferrosilicon Added, Gating System Design and Reaction Chamber Design on Inmold Process / M. T. Zar Myint, K. T. Lwin // International Scholarly and Scientific Research & Innovation. – 2008. – Т. 2, № 12. – P. 377-382.

100. Pietrowski S. Control of cast iron and casts manufacturing by Inmold method / S. Pietrowski // Archives of foundry engineering. – 2009. – Т. 9, № 3. – P. 133-142.

101. Макаревич О. П. Виробництво виливків із спеціальних сталей / О. П. Макаревич, Г. Є. Федоров, Є. О. Платонов. – К. : НТУУ «КПІ», 2005. – 712 с.

102. Фесенко А. Н. Исследование процессов получения отливок с дифференцированной структурой и свойствами методом компьютерного моделирования / М. А. Фесенко, А. Н. Фесенко // ВІСНИК Донбаської державної машинобудівної академії. – 2010. – № 3(20). – С. 261-267.

103. Вольнов И. Н. Компьютерное моделирование литейных процессов при производстве ТПА / И. Н. Вольнов // Трубопроводная арматура и оборудование. – 2008. – № 5(38). – С. 108-110.

104. David P. Gating system design to cast thin wall ductile iron plates / P. David, J. Massone, R. Boeri, J. Sikora // International Journal of Cast Metals Research. – 2006. – Т. 19, № 2. – С. 98-109.

105. Соценко О. В. Компьютерное моделирование технологического процесса литья деталей энергоемких промышленных изделий / О. В. Соценко, И. Ю. Посыпайко, А. В. Белич // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2011. № 2(24). – С. 20-23.

106. ЗАО «НПО МКМ» Моделирование литейных процессов: что и как выбрать? / ЗАО «НПО МКМ», ООО «ПроМодель» // Литейщик России. – 2010. – № 5. – С. 11-14.

107. Заблоцкий В. К. Особенности абразивного износа комплексных В–Cr–Al покрытий на углеродистых сталях / В. К. Заблоцкий, Ю. Г. Дьяченко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2006. – № 4(22). – С. 59-62.

108. Чепурко В. Г. Вычисление погрешностей измерений / В. Г. Чепурко, В. Г. Нижнин, Н. И. Соколова. – К. : Вища школа, 1978. – 38 с.

109. Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М. : Машиностроение, 1980. – 304 с.

110. Рябчій В. А. Теорія похибок вимірювань: Навч.посібник / В. А. Рябчій, В. В. Рябчій. – Дніпропетровськ : НГУ, 2006. – 166 с.

111. Сучков А. Н. Применение математических методов планирования экспериментов в лабораторных и научно-исследовательских работах / А. Н. Сучков, В. М. Жураковский. – Ростов-на-Дону : Ред.-изд. отдел РИСХМа, 1980. – 146 с.

112. Ivanov V. Silicon effect on the formation of graphite inclusions in gray cast iron / V. Ivanov, V. Pirozhkova, V. Lunev // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – № 4(12). – P. 26-30.

113. Фесенко М. А. Перспективные направления использования метода внутриформенного модифицирования расплава для изготовления отливок с заданными эксплуатационными свойствами / М. А. Фесенко, А. Н. Фесенко // Литье и металлургия. – 2013. – № 4(73). – С. 35-41.

114. Фесенко М. А. Новые технологии изготовления отливок модифицированием чугуна в литейной форме / М. А. Фесенко // Металл и литье Украины. – 2014. – № 11. – С. 10-16.

115. Пат. № 41383 U200811908, B22 D27/00. Спосіб виготовлення виливків з диференційованими структурою і властивостями / Фесенко А. М., Фесенко М. А., Косячков В. О., Ємельяненко К. В. – Заявл. 07.10.2008; опубл. 25.05.2009, Бюл. № 10, 2009.

116. Фесенко М. А. Внутриформенное модифицирование для получения чугуновых отливок с дифференцированными структурой и свойствами / М. А. Фесенко, А. Н. Фесенко, В. А. Косячков // Литейное производство. – 2010. – № 1. – С. 7-12.

117. Патент №27681 U200707328, B22D27/00. Спосіб виготовлення виливків з диференційованими властивостями / Фесенко М. А., Косячков В. О., Фесенко А. М. – Заявл. 02.07.2007; опубл. 12.11.2007, Бюл. № 18, 2007.

118. Нетребко В. В. Особенности процессов образования карбидов и распределения Cr, Mn и Ni в белых чугунах / В. В. Нетребко // Литье и металлургия. – 2015. – № 3 (80). – С. 40-46.

119. Радченко К. С. Хромомарганцеві зносостійкі чавуни для роботи в умовах гідроабразивного зношування : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.16.04 "ливарне виробництво" / Радченко К. С. – Київ, 2015. – 24 с.

ДОДАТОК А

ЗАТВЕРДЖУЮ
Приватний підприємець
Рибко О.О.
Рибко О.О.

АКТ

Цей акт складено в тому, що в лютому 2015 р. в рамках допомоги зоні антитерористичної операції (АТО) за замовленням приватного підприємця Рибко Олега Олександровича в лабораторії кафедри ливарного виробництва чорних і кольорових металів (ЛВЧКМ) Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» (НТУУ «КПІ») м. Київ співробітниками кафедри ЛВЧКМ були виконані дослідні виливки «Прес-форма військової каски» із високоміцного чавуну з кулястим графітом – 1 шт, алюмінієвого сплаву марки АК7 – 1 шт, а також двошарові виливки «Плита броньова» з твердого зносостійкого чавуну в одній частині та високоміцного чавуну з кулястим графітом у іншій частині – 5 шт.

Отримані дослідні виливки є якісними, мають задану литу структуру і в даний час проходять всебічні випробування з метою налагодження виробництва і постачання військовослужбовцям обмундирування вітчизняного виробництва.




Зав каф. ЛВЧКМ к.т.н. доц. НТУУ «КПІ»		Кочешков А.С.
К.т.н., доц. НТУУ «КПІ»		Самарай В.П.
Докторант НТУУ «КПІ» к.т.н. доц.		Фесенко М.А.
Аспірант НТУУ «КПІ»		Фесенко К.В.
Аспірант НТУУ «КПІ»		Лук'яненко І.В.

Рис. А.1. Акт випробовування технології виготовлення двошарових виливків «Прес-форма військової каски» та «Плита броньова» в лабораторії промислового типу

ЗАТВЕРДЖЕНО
Директор ТОВ НВЦ «Армко»
Стеблін В.С.



АКТ

Цей акт складено, в тому, що в квітні 2016 року на замовлення ТОВ НВЦ «Армко» м. Київ в лабораторії кафедри ливарного виробництва чорних і кольорових металів (ЛВЧКМ) Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» (НТУУ «КПІ») м. Київ співробітниками кафедри ЛВЧКМ була виготовлена лита деталь «Корпус вібратора» масою 18 кг із чавуну марки СЧ20.

Технологічний процес отримання литої деталі «Корпус вібратора» полягав у відплавлянні чавуну доєвтектичного складу в печі та заливання до ливарної форми, де він проходив внутрішньоформову обробку феросиліцієм марки ФС75. Температура розплаву, який заливали в піщано-глинясті форми складала 1420...1450 °С.

Візуальний контроль якості литої деталі не виявив дефектів, стан виплавки був задовільний. Металографічним аналізом приливних проб до литої деталі встановлено, що во всіх її перерізах кристалізувався сірий чавун з пластинчастим графітом в перліто-феритиній металевій матриці. Твердість чавуну складала 160...180 НВ. Ці результати відповідають чавуну марки СЧ20.

Після виготовлення лита деталь «Корпус вібратора» піддавалась механічній обробці, після якої дефектів також було не виявлено.

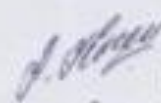
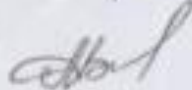
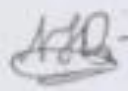
В.о. зав. кафедрою ЛВЧКМ		Кочешков А.С.
к.т.н., доц. НТУУ «КПІ»		
К.т.н., доц. НТУУ «КПІ»		Фесенко М.А.
Аспірант НТУУ «КПІ»		Лук'яненко І.В.

Рис. А.2. Акт випробовування технології виготовлення двошарового виливка «Корпус вібратора» в лабораторії промислового типу

ДОДАТОК Б
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Фесенко М. А. Графитизирующее модифицирование чугуна в литейной форме / М. А. Фесенко, В. А. Косячков, А. Н. Фесенко, **И. В. Лукьяненко**, Е. В. Фесенко // Металл и литье Украины. – 2015. – № 10 (269). – С.10-15.
2. Kosiachkov V. O. The Time Factor in the Spheroidizing and Graphitizing Modification and Cast Iron Crystallization / V. O. Kosiachkov, М. А. Fesenko, Е. V. Fesenko, **I. V. Lukianenko** // Materials Science. Non-equilibrium Phase Transformations. – 2016. – № 2. – С. 25-29.
3. Фесенко М. А. Влияние способа модифицирования на структуру и свойства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом в литом состоянии / М. А. Фесенко, Е. В. Фесенко, В. А. Косячков, **И. В. Лукьяненко** // Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. – 2016. – № 1 (37). – С. 96-101.
4. **Лукьяненко И. В.** Особенности технологического процесса изготовления двухслойных чугуновых отливок с дифференцированными свойствами / **И. В. Лукьяненко** // Процеси лиття. – 2019. – № 2 (134). – С. 15-20.
5. **Лукьяненко И. В.** Исследование процессов дифференциации структуры чугуновых отливок методом компьютерного моделирования / **И. В. Лукьяненко** // Металл и литье Украины. – 2019. – № 1-2. – С. 41-46.
6. **Лукьяненко И. В.** Исследование технологических параметров процесса получения чугуновых отливок для работы в условиях износа / **И. В. Лукьяненко** // Металл и литье Украины. – 2019. – № 3-4. – С. 34-40.
7. Патент № 126086 U2017 11757, B22D27/00. Спосіб виготовлення багаточастикових литих деталей / Фесенко М. А., **Лук'яненко І. В.**, Погребняк І. О. – Заявл. 01.12.2017; опубл. 11.06.2018, Бюл. № 11, 2018.

8. Косячков В. О., **Лук'яненко І. В.** Фактори часу в процесі сфероїдизувального та графітизувального модифікування і кристалізації чавуну / Литве. Металлургия. 2014 : материалы X Международной научно-практической конференции (20-23 мая 2014 года). – Запорожье : ЗТПП, 2014. – С. 137-138.

9. Косячков В. О., Михалевич Д. О., **Лук'яненко І. В.** Вплив кремнію та модифікування магнієм на структуроутворення чавуну під час кристалізації / Нові матеріали і технології в машинобудуванні : матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції (20-21 травня 2014 року). – Київ : НТУУ „КПІ”, 2014. – С. 66-67.

10. Фесенко М. А., Косячков В. О., Фесенко А. М., Михалевич Д. О., **Лук'яненко І. В.** Метод виготовлення двошарових чавунних виливків / Нові матеріали і технології в машинобудуванні : матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції (21-22 травня 2015 року). – Київ : НТУУ „КПІ”, 2015. – С. 142.

11. Фесенко Е. В., **Лукьяненко И. В.**, Фесенко М. А., Ямшинский М. М. Способ изготовления чугуновых отливок с дифференцированной структурой и свойствами / Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах : матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції (6-9 жовтня 2015 року). – Запоріжжя : ЗНТУ, 2015. – С. 99-101.

12. Фесенко М. А., Фесенко А. М., Фесенко К. В., **Лук'яненко І. В.** Дослідження процесу отримання двошарових виливків методом фізичного моделювання / Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра : матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції (19 квітня 2016 року). – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – С. 955-962.

13. Фесенко М. А., Косячков В. А., Фесенко А. Н., Фесенко Е. В., **Лукьяненко И. В.** Способ получения износостойких двухслойных чугуновых литых деталей / Литве. Металлургия. 2016 : материалы XII Международной научно-практической конференции (24-26 мая 2016 года). – Запорожье : ЗТПП, 2016. – С. 221-222.

14. Фесенко М. А., Цыгановский К. В., Фесенко Е. В., **Лукьяненко И. В.** Новый способ изготовления двухслойных чугунных отливок для работы в условиях ударно-абразивного износа / Нові матеріали і технології в машинобудуванні : матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції (30-31 травня 2016 року). – Київ : НТУУ „КПІ”, 2016. – С. 142-143.

15. Фесенко М. А., Фесенко А. М., Фесенко К. В., **Лук'яненко І. В.** Способи отримання литих шаруватих деталей / Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 6 : матеріали VI Міжнародної наукової конференції (01-02 грудня 2016 року). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. – С. 326-328.

16. Фесенко М. А., Фесенко Е. В., **Лукьяненко И. В.** Технология получения чугунных отливок с твердой износостойкой поверхностью и вязкой ударостойкой частью из одного расплава / Уральская школа молодых металлосведов : сборник материалов XVII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлосведов – молодых ученых (5-9 декабря 2016 года). – Екатеринбург : Уральский федеральный университет, 2016. – С. 323-326.

17. Фесенко М. А., **Лук'яненко І. В.** Комп'ютерне моделювання способу виробництва двошарових литих деталей / Нові матеріали і технології в машинобудуванні : матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції (30-31 травня 2017 року). – Київ : НТУУ „КПІ”, 2017. – С. 186-187.

18. Фесенко М. А., **Лук'яненко І. В.** Розроблення технології отримання чавунних виливків з робочою зносостійкою та в'язкою монтажною частинами / Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві : матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції (25-28 вересня 2017 року). – Краматорськ : ДДМА, 2017. – С. 78-80.

19. Фесенко М. А., **Лук'яненко І. В.** Спосіб виготовлення чавунних деталей з диференційованою структурою та властивостями / Прикладні науково-технічні дослідження : матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції (03-05 квітня 2018 року). – Івано-Франківськ : Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаника, 2018. – С. 146.

20. Фесенко М. А., **Лук'яненко І. В.**, Кошіль А. В. Комп'ютерне моделювання процесу виготовлення двошарових чавунних виливків з одного вихідного розплаву / Нові матеріали і технології в машинобудуванні : матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції (24-25 квітня 2018 року). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – С. 107-108.

21. Фесенко М. А., **Лук'яненко І. В.** Розроблення режимів лиття процесу виготовлення двошарових чавунних виливків із одного базового розплаву / Нові матеріали і технології в машинобудуванні : матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції (30-31 травня 2019 року). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – С. 109-110.